

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ГІДРОАЕРОМЕХАНІКИ І
МЕХАНОТРОНІКИ**

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри
_____ О.Ф. Луговський
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності _____ 131 Прикладна механіка _____
(код і назва спеціальності)

на тему: Удосконалення аеродинамічних параметрів промислових систем
очищення повітря _____

Виконав : студент 6 курсу, групи МА-61м
(шифр групи)

Клименко Іван Миколайович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н. , професор , Ковальов В.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
Механіко-машинобудівний інститут**

Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень «магістр»
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ О. Ф. Луговський
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2017 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Клименко Івана Миколайовича _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Удосконалення аеродинамічних параметрів промислових систем очищення повітря _____

науковий керівник дисертації д.т.н. , професор Ковальов В.А. _____ ,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «15» березня 2018 р. № 934-с

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження процес очищення запилованого повітря методом циклонування _____

4. Предмет дослідження аеродинамічні особливості вихрових потоків у циклоні з напрямними апаратами _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналітичний огляд сучасних методів і конструкцій циклонів _____

2. Проектування конструкції циклону _____

3. Фізичне моделювання роботи циклону _____

4. Аналітичне моделювання _____

2.Тези на конференцію в червні 2018р. _____

	Прізвище, ініціали та посада	Підпис, дата

--	--	--	--

ния	Строк в
-----	---------

--	--	--	--

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

на магістерську дисертацію

виконану на тему: Удосконалення аеродинамічних параметрів промислових систем
очищення повітря

студентом: Клименко Іваном Миколайовичем

Робота виконана на 96 сторінках , містить 41 ілюстрацію , 31 таблицю. При підготовці використовувалася з 36 різних джерел.

Актуальність

В час коли гостро встала проблема глобального потепління і вся планета почала боротися з шкідливими викидами у навколишнє середовище , у більшості країн підняли вимоги до чистоти промислового повітря.

Актуальність роботи полягає у підвищенні ступеня очистки промислового повітря при невеликій вартості та значних габаритних розмірів.

Мета

Метою даної дисертації є дослідження і розробка нового типу фільтру котрий буде мати більшу ступінь очистки без зміни габаритів.

Завдання

Для виконання поставленої мети потрібно вирішити наступні завдання:

- 1.Огляд і аналіз існуючих методів та конструкцій
- 2.Проектування конструкції циклону
- 3.Проведення експериментальних дослідів
- 4.Проведення математичних дослідів

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження виступає процес очищення запилованого повітря методом циклонування.

Предмет дослідження

Предметом дослідження виступають аеродинамічні особливості вихрових потоків у циклоні з напрямними апаратами.

Наукова новизна

Наукова новизна полягає у в інноваційному підході до очищення повітря шляхом встановлення в середину циліндричної поверхні фільтруючої сітки.

Практична цінність

В якості результату розроблено фільтр типу циклон котрий має більшу ступінь очистки в порівнянні з аналогами без зміни габаритних розмірів, що дає можливість в майбутньому зменшити кількість коштів котрі будуть витрачатися на очищення повітря.

РЕФЕРАТ

на магистерскую диссертацию

выполненную на тему: Усовершенствование аэродинамических параметров
промышленных систем очистки воздуха

студентом: Клименко Иваном Николаевичем

Работа выполнена на 96 страницах, содержит 41 иллюстрацию, 31 таблицу. При подготовке использовались с 36 различных источников.

Актуальность

Во время когда остро встала проблема глобального потепления и вся планета начала бороться с вредными выбросами в окружающую среду, в большинстве стран подняли требования к чистоте промышленного воздуха.

Актуальность работы заключается в повышении степени очистки промышленного воздуха при небольшой стоимости и значительных габаритных размеров.

Цель

Целью данной диссертации является исследование и разработка нового типа фильтра который будет иметь большую степень очистки без изменения габаритов.

Задание

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1.Огляд и анализ существующих методов и конструкций
2. Проектирование конструкции циклона
- 3.Проведение экспериментальных опытов
- 4.Проведение математических исследований

Объект исследования

Объектом исследования выступает процесс очистки запыленного воздуха методом циклонирования.

Предмет исследования

Предметом исследования выступают аэродинамические особенности вихревых потоков в циклоне с направляющими аппаратами.

Научная новизна

Научная новизна заключается в в инновационном подходе к очистке воздуха путем установления внутрь цилиндрической поверхности фильтрующей сетки.

Практическая ценность

В качестве результата разработан фильтр типа циклон который имеет большую степень очистки по сравнению с аналогами без изменения габаритных размеров, что дает возможность в будущем уменьшить количество средств которые будут тратиться на очистку воздуха.

ABSTRACT

for a master's thesis

performed on the topic: Improvement of aerodynamic parameters of industrial air purification systems

student: Klimenko Ivan Nikolaevich

The work is executed on 96 pages, contains 41 illustrations, 31 tables. The preparation was used from 36 different sources.

Topicality

At a time when the problem of global warming arose and the entire planet began to fight off harmful emissions into the environment, most countries have raised the requirements for the purity of industrial air.

The urgency of the work is to increase the degree of purification of industrial air at a small cost and significant overall dimensions.

Purpose

The purpose of this dissertation is to research and develop a new type of filter which will have a greater degree of purification without changing the dimensions.

Solution

To accomplish this goal you need to solve the following tasks:

1. Review and analysis of existing methods and designs
2. Project design of the cyclone
3. Conducting experimental experiments
4. Conducting mathematical experiments

Object of research

The object of the study is the process of cleaning the polluted air by cyclone.

Subject of research

The subject of the study is the aerodynamic features of vortex flows in the cyclone with guiding apparatuses.

Scientific novelty

The scientific novelty lies in the innovative approach to air purification by installing in the middle of the cylindrical surface of the filtering mesh.

The practical value of research

As a result, a cyclone-type filter, which has a higher degree of purification compared to its counterparts without changing overall dimensions, has been developed, which makes it possible in the future to reduce the amount of money that will be spent on air purification.

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: Удосконалення аеродинамічних параметрів промислових систем
очищення повітря

Київ – 2018 року

Зміст

Розділ 1.Огляд і аналіз існуючих методів та конструкцій.....	5
1.1 Огляд існуючого обладнання для очищення повітря.....	5
1.2 Результати патентного огляду існуючих конструкцій та методів знепилення повітря	15
1.3 Існуючі теорії в області циклонування.....	18
1.4 Методи дослідження циклонів.....	20
1.5 Постановка задачі , мета , задачі дослідження.....	25
Розділ 2.Проектування конструкції циклону.....	26
2.1 Розробка фізичної моделі циклона.....	26
2.2 Обґрунтування конструктивних параметрів.....	28
2.3 Аеродинамічний розрахунок циклону.....	30
2.4 Висновки.....	33
Розділ 3.Фізичне моделювання роботи циклону.....	34
3.1 Напрямок та об'єкт дослідження.....	34
3.2 Експериментальний стенд для дослідження характеристик циклону.....	37
3.3 Визначення продуктивності циклона.....	39
3.4 Визначення гідравлічного опору.....	41
3.5 Статична обробка результатів експерименту.....	41
3.6 Висновки.....	45
Розділ 4. Математичне моделювання.....	46
4.1 Граничні та початкові умови для математичного моделювання повітря у циклоні.....	46
4.2 Результати дослідження гідравлічного опору циклона.....	55
4.3 Вплив форми елементів конструкції циклона на його гідравлічний опір.....	56
4.4 Аналіз руху повітря у циклоні.....	60
4.5 Дослідження статичного тиску.....	61
4.6 Результати дослідження гідравлічного опору циклона при комп'ютерному моделюванні.....	66
4.7 Висновки.....	72
Розділ 5. Стартап проект.....	73
5.1 Опис ідеї проекту.....	73

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	74
5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту.....	74
5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	78
5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	80
5.6 Висновки	82
Розділ 6. Охорона праці.....	83
6.1 Мікроклімат.....	84
6.2 Освітлення.....	85
6.3 Електробезпека.....	86
6.4 Пожежна безпека.....	87
6.5 Шум.....	89
6.6 Висновки.....	91
7. Основні висновки та результати роботи.....	92
Список використаних літературних джерел.....	93

Вступ

Багатовікова господарська діяльність людства, інтенсифікація промислового виробництва, зневага до крихкої рівноваги природних екологічних систем приводять навколишнє середовище до стану кризи та виникнення різних аномалій, наприклад, незворотних температурних змін в атмосфері планети, ураганів, повеней тощо. Тому стало досить актуальним завдання раціонального природокористування у поєднанні з ефективним зниженням негативного впливу подібних факторів, зокрема промислового виробництва, на біосферу.

Серед спеціальних вимог до створення сучасних промислових виробництв є наступні:

- забезпечення високого рівня комплексної переробки сировини, що дозволяє досягти ефективного вилучення шкідливих відходів;
- економне використання тепла при спалюванні палива та хімічних перетвореннях;
- запровадження новітніх методів і апаратури, які забезпечують створення замкнених енергетичних циклів;
- розробка методів та апаратури для забезпечення спеціальних умов очищення газових потоків, утилізації, зберігання або знищення рідких і твердих шкідливих відходів виробництва.

Одними з досить напружених з точки зору екологічної безпеки галузей промисловості тривалий час є хімічне, металургійне і деревообробне виробництва. Шкідливі викиди подібних виробничих процесів можуть суттєво впливати на навколишнє середовище та стан здоров'я персоналу, тому будь-які інновації у цій області вентиляції приміщень, пилоосадження, аспірації та фільтрації можуть підвищити ефективність та екологічну безпеку виробництва. Цією проблемою займалися і займаються багато відомих людей наприклад : Батлук В. А. , Василевський М. В. , Ветошкин А.Г. , Асламова В.С. , Ватін М. І.[3, 6, 9]

Широко відомі методи електростатичного осадження пилу, фільтрації тканинними та рукавними фільтрами з використанням зносостійких матеріалів та методів самоочищення. Але одним з поширених методів очищення повітря та газів у подібних технологічних процесах є використання різноманітних фільтрів циклонного типу. У штучно створеному у межах такого апарату вихровому потоці повітря та газу (циклоні) завдяки дії на тверді та рідкі частки відцентрових сил інерції відбувається їх відокремлення від основного потоку та утилізація у спеціальних бункерах [1, 3] . Ступінь

очищення газів може досягати 95%, що вважають досить ефективним з точки зору екологічної безпеки виробництва.

Циклони можуть використовуватися як для попереднього очищення газів і встановлюватися перед тканинними фільтрами або рукавними фільтрами, так і самостійно. Через надмірну кількість використаного газу, що очищається, циклони можуть встановлюватися по одному (одиначні циклони) або об'єднуватися в групи з двох, чотирьох, шести або восьми циклонів (групові циклони) і можуть застосовуватися для очищення газів від декількох сотень до сотень тисяч кубометрів на годину [3, 4].

Поряд з безсумнівними перевагами циклонів з точки зору досить високої продуктивності та ефективності очищення повітря та газів вони мають певний резерв для удосконалення конструкцій та методів очищення, зокрема враховуючи аеродинамічні особливості замкнених вихрових потоків в межах конструкції. Це дає можливість дослідити аеродинамічний механізм роботи циклону та запропонувати нові сучасні технічні рішення щодо врахування певних характеристик повітряного потоку, зниження аеродинамічного опору та втрат тиску на агрегаті.

Такі заходи мають підвищити енергоефективність подібних систем очищення, універсальність відносно існуючих конструкцій та значно зменшити витрати на їх обслуговування.

Метою поданої магістерської дисертації є підвищення ефективності очищення газу та повітря від пилу за рахунок дослідження аеродинамічних полів швидкості та тиску, визначення оптимальних технічних характеристик циклонів та режимів їх роботи у виробничих умовах.

Для досягнення поданої мети необхідно знайти рішення наступних завдань:

1. Виконати аналітичний огляд існуючих методів та конструкцій систем очищення повітря та виявити суттєві недоліки щодо їх конструкцій та режимів роботи.
2. Запропонувати проектне рішення для створення фізичної моделі досліджуваного пристрою, розробити експериментальний стенд для випробувань модельного зразка.
3. Провести контрольні вимірювання полів швидкостей та статичного тиску повітря у робочих зонах циклону.
4. Виконати аналіз результатів вимірювань та оцінити фізичну модель з точки зору достовірності результатів та створення бази для теоретичного дослідження об'єкта.

5. Побудувати математичну модель циклона на основі пакету прикладних програм та порівняти результати розрахунків з отриманими даними фізичного моделювання.
6. Зробити висновки щодо доцільності впровадження результатів дисертації у промисловість та дотримання вимог до проекту у форматі «старт-ап».

РОЗДІЛ 1.

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ТА АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ

1.1. Огляд існуючого обладнання для очищення повітря

Пилоуловлювальне обладнання при всьому його різноманітті може бути класифіковане за низкою ознак: за призначенням, за основним способом дії, за ефективністю, за конструктивними особливостями [7]. Класифікація пилоуловлюючого обладнання дана у стандарті ГОСТ 25199-82 «Устаткування пилоуловлювальне. Класифікація», схематичне зображення якого наведено на рис.1.1.



Рис.1.1. Класифікація пилоуловлювального обладнання

Циклони є найбільш поширеними апаратами газоочищення [36], широко вживаними для уловлювання з газів та повітря твердих часток. Циклони знаходять застосування в самих різних галузях промисловості: в чорній і кольоровій металургії, хімічній та нафтовій промисловості, промисловості будівельних матеріалів, енергетиці та інших. При невеликих капітальних витратах і експлуатаційних витратах циклони в залежності від характеристик вловлює пилю, типи і режими роботи циклону забезпечують ефективність очищення газів 80-95%. Циклони можуть використовуватися як для попереднього очищення газів і встановлюватися перед тканинними фільтрами або

рукавними фільтрами, так і самостійно. Основними елементами циклонів є вхідний патрубок, корпус, що складається з конічної і циліндричної частин, вихлопної патрубок і бункер (рис.1.2).

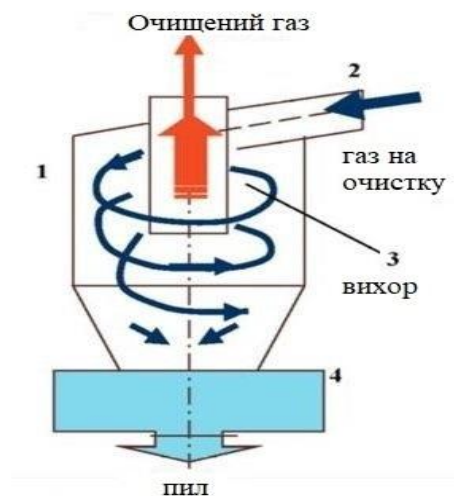


Рис 1.2. Сухий механічний пиловловлювач

Через надмірну кількість використаного газу, що очищається циклони можуть встановлюватися по одному (одиначні циклони) або об'єднуватися в групи з двох, чотирьох, шести або восьми циклонів (групові циклони). Циклони можуть застосовуватися для очищення газів від декількох сотень до сотень тисяч кубометрів в годину. Циклони можуть виготовлятися з «лівим» і «правим» обертанням газового потоку. Зазвичай «правим» прийнято називати обертання потоку в циклоні за годинниковою стрілкою (якщо дивитися з боку вихлопного патрубка), «лівим» - обертання потоку проти годинникової стрілки. Напрямок обертання вибирають виходячи з умов компоновки циклону в схемі, а також розташування циклонів в групі. Ефективність очищення газу в циклоні в основному визначається його типом, розміром, дисперсним складом і щільністю частинок вловлювання пилу, а також в'язкістю газу. Зі зменшенням діаметра циклону і підвищенням до певної межі швидкості газу в циклоні ефективність очищення збільшується. На сьогоднішній день розроблено безліч типів циклонів, які широко використовуються в техніці знепилювання. Вони можуть відрізнятися один від одного співвідношенням розмірів, формою та іншими параметрами.

1.1.1.«Сухі» механічні пиловловлювачі

Їх умовно ділять на три групи[16]:

- Пилоосадні камери, принцип роботи яких основа на дії сили тяжіння (гравітаційної сили);

- Інерційні пиловловлювачі, принцип роботи яких заснований на дії сили інерції;

- Циклони, батарейні циклони, що обертаються пиловловлювачі принцип роботи яких заснований на дії відцентрової сили.

Пилоосадна камера являє собою порожнистий або з горизонтальними полицями у внутрішній порожнині прямокутний короб, у нижній частині якого є отвір або бункер для збирання пилу. Швидкість газу в камерах становить 0,2-1,5 м / с, гідравлічний опір 50-150 Па. Пилоосадні камери придатні для уловлювання великих часток (розміром не менше 50 мкм).

Ступінь очищення газу в камерах не перевищує 40-50%. Перегородки в інерційних пиловловлювачах встановлюють для зміни напрямку руху газів. Газ в інерційний апарат надходить зі швидкістю 5 - 15 м / с. Пилі частки, прагнучи зберегти напрямок руху після зміни напрямку руху потоку газів, осідають в бункері. Ці апарати відрізняються від звичайних пилоосадних камер великим опором і високим ступенем очищення газу.

Велика увага при проектуванні пневмотранспортних та інших пристроїв пилоочищення необхідно приділяти вузлам відділення матеріалу від транспортуючого повітря - розвантажувальним й повітряним пристроїв (циклонів, фільтрів тощо).

Перевага віддається відцентровим циклонам, які виконують одночасно і роль пиловловлюючого апарату. Ефективність уловлювання пилу в циклонах підвищується зі зменшенням діаметру корпусу, але при цьому знижується їхня пропускна здатність. Для забезпечення відповідної продуктивності пневмотранспортної установки невеликі циклони групують в батарею, коефіцієнт пиловловлення якої становить 0,76 - 0,85 і дещо підвищується зі збільшенням вхідної швидкості (з 11 до 23 м / с). Використання замість циклонів вихрових пиловловлювачів забезпечує уловлювання частинок пилу розміром 5 - 7 мкм.

Повітря після розвантажувальних пристроїв або циклонів, насичений субмікронними частинками, має спрямовуватися на доочищення в пиловловлювачі, що характеризуються:

- ступенем пиловловлення - відношенням кількості пилу затриманої пиловловлювачем, до кількості пилу в очищуваному запиленому повітрі;
- опором пиловловлювача, що визначає економічність процесу пиловловлення;
- габаритними розмірами і масою, надійністю і простотою обслуговування.

Циклони рекомендується використовувати для попереднього очищення газів і

встановлювати перед вискоєфективними апаратами (наприклад, фільтрами або електрофільтрами) очищення.

Основні елементи циклонів - корпус, вихлопна труба, бункер. Газ надходить у верхню частину корпусу через вхідний патрубок, приварений до корпусу тангенціально.

Уловлювання пилу відбувається під дією відцентрової сили, що виникає при русі газу між корпусом і вихлопною трубою. Вловлений пил зсипається до бункера, а очищений газ викидається крізь вихлопну трубу.

У залежності від продуктивності циклони можна встановлювати по одному (одиначні циклони) або об'єднувати в групи з двох, чотирьох, шести або восьми (групові циклони). Конструктивною особливістю батарейних циклонів є те, що закручування газового потоку і уловлювання пилу в них забезпечується розміщеними в корпусі апарату циклонними елементами.

1.1.2. «Сухі» пористі фільтри

Для очищення запилених газів все більшого поширення набуває на останніх щаблях суха очищення рукавними фільтрами[16]. Ступінь очищення газів у них при дотриманні правил техніч-1 чеської експлуатації досягає 99,9%.

Класифікація рукавних фільтрів можлива:

- за формою фільтрувальних елементів (рукавні, плоскі, клинові і ін) і наявності в них опорних пристроїв (каркасні, рамні);
- за місцем розташування вентилятора щодо фільтру; способу регенерації тканини (зворушує, зі зворотним, з імпульсною продувкою і ін);
- за наявністю та формою корпусу для розміщення тканини - прямокутні, циліндричні, відкриті (безкамерні);
- за числом секцій в установці (одно-і багатокамерні);
- за видом використовуваної тканини (наприклад, склотканини).

В якості фільтрувальних матеріалів застосовують тканини з природних волокон (вовняні, рідко бавовняні), з синтетичних (нітронові, лавсанові, поліпропіленові та ін), а також склотканини. Найбільш поширені лавсан, терилен, дакрон, нітрон, орлон, оксалон, сульфон. Останні два матеріали представляють поліамидну групу волокон, які мають термостійкість при 250 - 280 ° С. Для фільтрувальних тканин найбільш характерно саржевое

переплетення, при цьому застосовують також неткані матеріали - фетр, виготовлені войлокуванням вовни і синтетичних волокон.

Нагнітальний рукавний фільтр працює наступним чином. Повітря під тиском надходить у верхню розподільну коробку, а звідти - в матерчасті вертикальні рукави. Пройшовши крізь рукави і залишивши на їхній внутрішній поверхні пил, очищене повітря виходить в атмосферу (приміщення). Рухома рама з дротяною сіткою при підйомі і опусканні стискає рукава в поперечному перерізі, завдяки чому пил скидається у мішок і віддаляється гвинтовим конвеєром. Недолік таких фільтрів - незадовільна очищення фільтруючої тканини, в результаті чого значно зростає опір фільтру і знижується його ККД.

Найбільшого поширення набув всмоктуючий рукавний фільтр, рукави якого укладені в герметичну шафу. Повітря, що підлягає очищенню, подається крізь нижню приймальну коробку до рукавів, заглушені зверху, проникає крізь тканину рукавів у шафу, віддаляється з нього крізь канал. Рукави фільтра очищаються від пилу за допомогою спеціального витрушуючого механізму. Недоліком всмоктувальних фільтрів є значне підсмоктування повітря (10 - 15% обсягу надходить на очищення) крізь нещільність.

Вітчизняною промисловістю випускаються фільтри рукавні: з імпульсною продувкою (ФРІ), каркасні імпульсні (ФРКІ), заводи-виробники ВАТ «СФ НПОГАЗ», ЗАТ «Кон-дор-Еко»; циклонні РЦІЕ, РЦІРЕ і РЦІЕК, завод-виробник ВАТ «Дзержінскхімаш »та інші, наприклад, ФРЦІ-30, фріа-900 за спецзамовленням.

Переважний розвиток отримали ФРКІ, швидкість фільтрування у яких на 20 - 30% вище, ніж у фільтрах з механічною регенерацією і зворотної продувкою. При ефективної регенерації короткими (0,1 - 0,2 с) імпульсами менше зношуються рукави, гідравлічний опір підтримується на рівні 1,0-1,5 кПа.

Фільтри рукавні складаються з корпусу з роздільним рукавної плитою, фільтрувальних елементів, клапанних секцій з роздавальними трубами для забезпечення регенерації рукавів імпульсами стислого повітря. У процесі фільтрації запилений газ проходить крізь тканину закритих знизу рукавів всередину, виходить крізь верхній колектор і видаляється з апарату.

Кожен рукав у фільтрі натягнутий на жорсткий каркас і закріплений на верхній решітці (плиті). Фільтри можуть бути зі входом газу: центральним; бічним; через бункер; з щілинним і з пірамідальними бункерами.

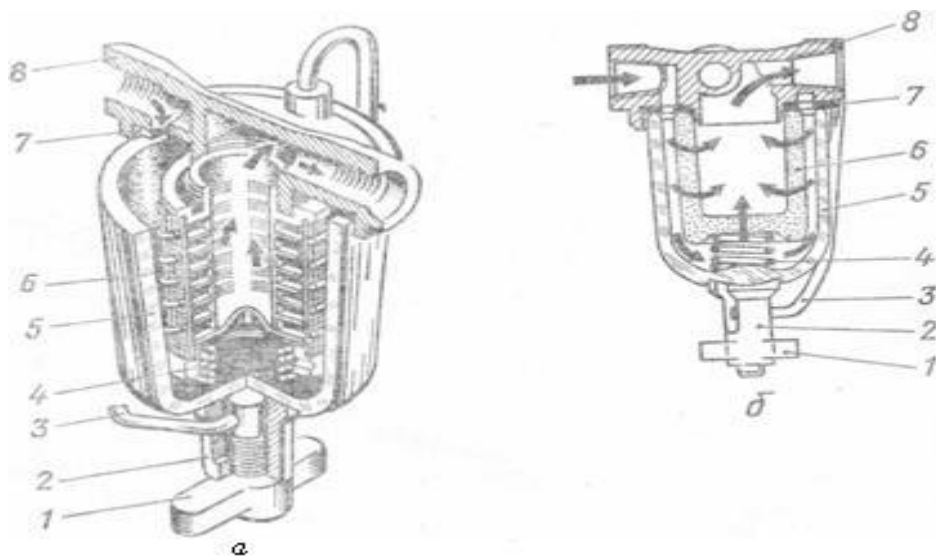


Рис.1.3 Сухий пористий фільтр

1.1.3. Електрофільтри

Метод електроосадження (уловлювання пилу в електричному полі) полягає в наступному. Частинки пилу (або крапельки вологи) спочатку отримують заряд від іонів газу, які утворюються в електричному полі високої напруги, а потім рухаються до заземленого осадного електрозарядного пристрою [16]. Потрапивши на заземлений уловлювач, частки прилипають і розряджаються. Коли осаджувальний електрод обростає шаром частинок, вони струшуються під впливом вібрації і збираються в бункері.

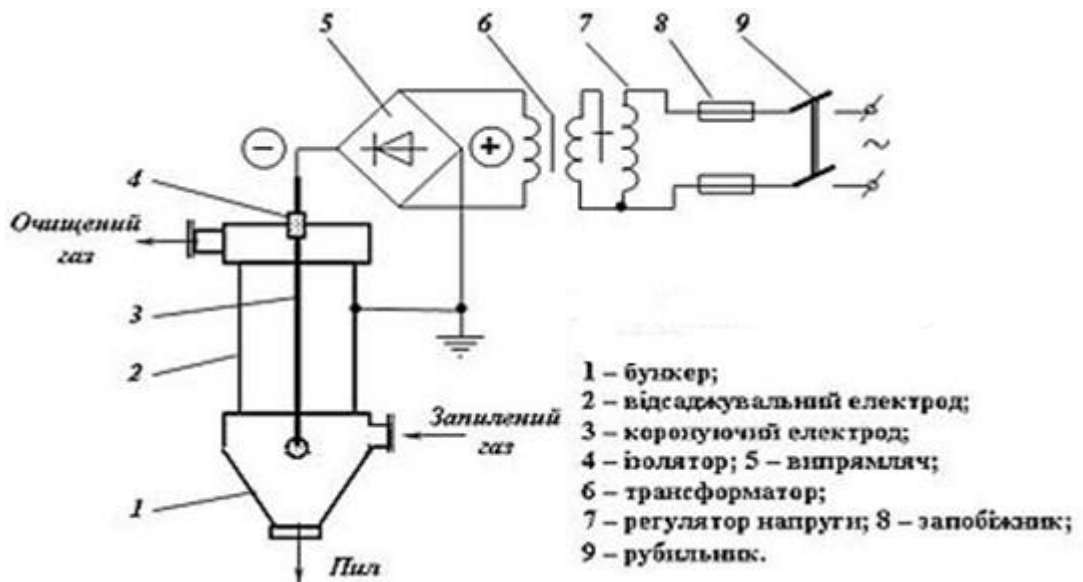


Рис.1.4 Електрофільтр

1.1.4. Апарати «мокрого» пило-та газоуловлювання

При очищенні газів від частинок пилу і переробці газоподібних відходів успішно застосовують мокре пиловловлення, суху і подальшу мокру очистку[16]. Розвинена поверхня контакту фаз сприяє збільшенню] ефективності пиловловлювання. У промисловості використовують мокрі пиловловлювачі крапельного, плівкового і барботажного типів. Конструктивно апарати можуть бути порожнистими, тарільчастими, механічної та ударно-інерційної дії, а також швидкісного типу (трубки Вентурі та інші інжектори).

Необхідно прагнути до створення мокрих промивачів з мінімальним гідравлічним опором, працездатних при низьких витратах води. Ефективність очищення пилу залежить від розмірів уловлювання частинок і від інших властивостей пилу. Необхідність концентрування системи «рідина-тверде тіло» з поверненням очищеної води на пиловловлення, накопичення в зрошуваній рідині розчинних компонентів пилу, ускладнює систему мокрого пиловловлювання.

1.1.5. Скрубери (газопромивачі)

При об'ємно-рідинному способі потік запиленого газу пропускають крізь певний об'єм рідини. Для цього використовують пінні пиловловлювачі з провальними тарілками або тарільчасті скрубери, ефективність яких може досягати 90 -95%.

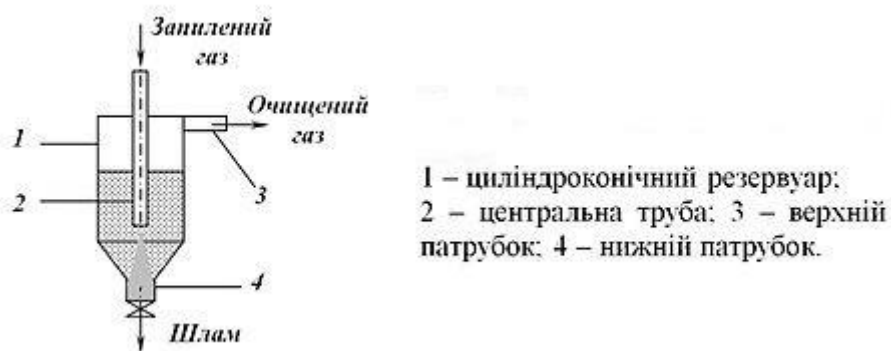


Рис. 1.5 Апарат мокрого пилоуловлювання

Для очищення або знешкодження газоподібних відходів або технологічних газів з метою вилучення з них супутніх (корисних) газоподібних компонентів широко використовують метод абсорбції, який заснований на безпосередній взаємодії газів з рідинами. Виділяють фізичну абсорбцію, засновану на розчиненні газу в рідині, і хемосорбцію, в основі якої лежить хімічна реакція між газом і рідким поглиначем.

Абсорбційній очистці піддають газоподібні відходи, що містять один або кілька видобутих компонентів. Залежно від використовуваного абсорбенту та його селективності можна назвати або один компонент, або послідовно кілька. У результаті абсорбції отримують очищений газ і насичений розчин, який повинен бути легко регенований з метою видобування корисних газів і повернення його на стадію абсорбції. Вимоги, яким повинна задовольняти абсорбційна апаратура, впливають з фізичного представлення явищ масопереносу в системах «газ-рідина». Процес масопереносу протікає на поверхні розділу фаз, і в конструкціях апаратів необхідно її максимально розвивати.

1.1.6. Циклони

Циклони призначені для сухого очищення газів від вибухонебезпечних часток, які не злипаються між собою від пилу [4]. Циклон ЦН застосовують також для очищення повітря в різних галузях промисловості. При використанні циклонів для очищення газу або повітря, що містить абразивний пил, рекомендується передбачати в місцях, що піддаються зносу приварення сталевих додаткових аркушів із зовнішнього боку.

Циклони з діаметром менше 800 мм через підвищений знос не слід застосовувати для уловлювання абразивного пилу. Циклони встановлюють як на всмоктуючій лінії, так і на нагнітальній лінії вентилятора. При абразивного пилу циклони рекомендується ставити перед вентилятором.

Коефіцієнт гідравлічного опору для одиночного циклону, віднесений до швидкості руху повітря в горизонтальному його перетині з урахуванням поправки на запиленість, становить 147. Допустиму запиленість очищуваного газу, $г / м^3$, для слабозлиплених часток пилу слід приймати не більше 1000, а для середньозлиплених - не більше 250. температура газу приймається не більше $400^{\circ}C$, а максимальний тиск не більше 5кПа.

1.1.7. Типи пиловловлювачів на базі циклонів

1.1.7.1. Пиловловлювач [6] являє собою камеру, в якій запилений потік робить поворот на 180 градусів, пил концентрується у обтічній поверхні і з частиною потоку надходить до

приймача; газ з приймача виходить до газопроводу чистого газу (рис.1.5)

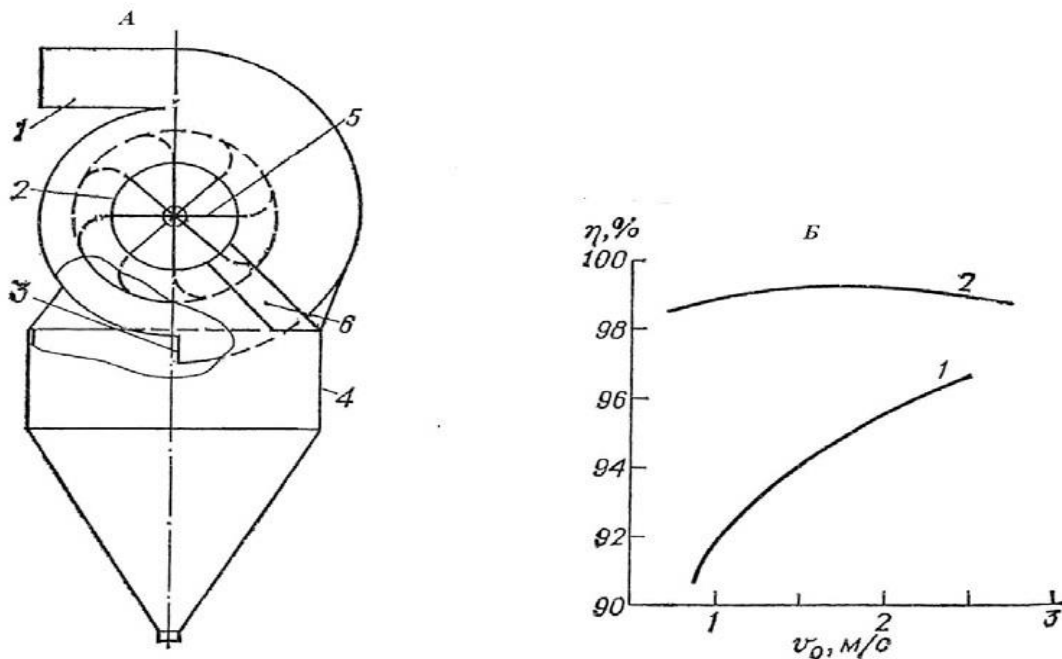


Рис. 1.6 А – равликовий пиловловлювач : 1 та 2 – патрубки для входу та виходу газу ; 3 – пиловідвідна щілина ; 4 – бункер ; 5 – направляючий апарат ; 6 – патрубок лінії циркуляції.

Б – Залежність загальної степені очистки пиловловлювача (1) та циклона (2) від швидкості повітря в перерізі апарату.

Усередині камери розташований радіальний напрямний апарат, крізь який потік виходить в газопровід чистого газу. Гідралічний опір не перевищує 500 Па. Апарат розвантажує потік від великих часток (пил до медіанного розміром частки 98 мкм уловлюються з ефективністю 0,85).

1.1.8. Апарат Карпуховича

Апарат Карпуховича [6] – равликовий пиловловлювач з периферійним виведенням концентрату пилу до виносного циклонного осаджувача частинок. В ньому потік робить поворот на 270 градусів, пил виводиться до виносного циклону. Потік виводиться також крізь радіальний направляючий апарат. Опір не перевищує 600 Па. Пил до медіанного розміром частки 28 мкм уловлюються з ефективністю 0,85. Іноді використовується в якості самостійного пиловловлювача. Відомі апарати з розкручуванням потоку в

1.1.9. Розвантажувач - пиловловлювач НДІ ПММ [5]

15



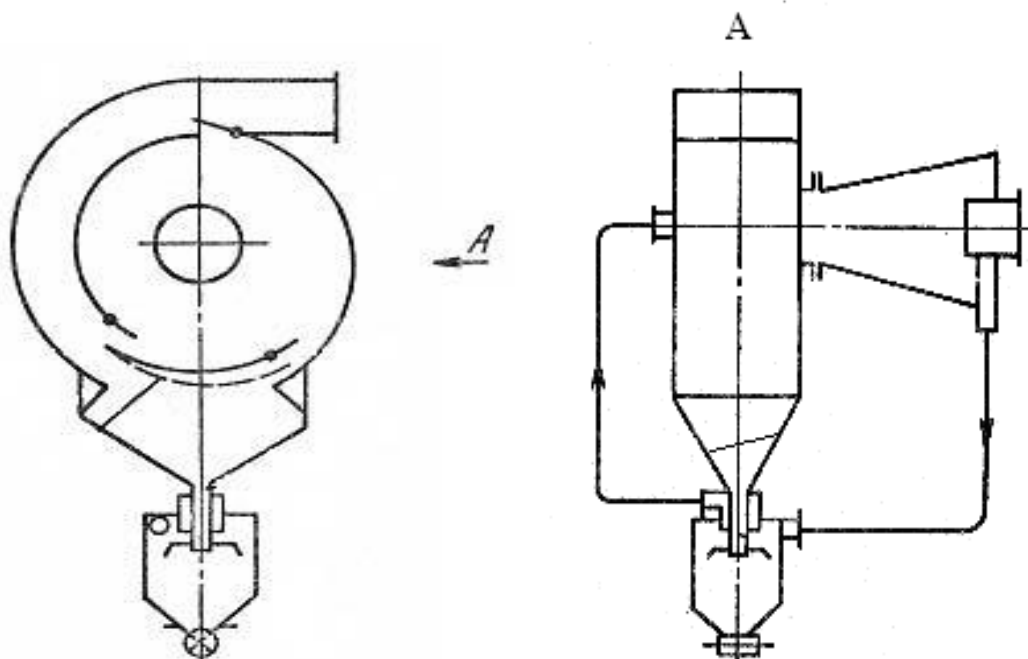


Рис. 1.8 Розвантажувач - пиловловлювач з приймальним циклоном [6]

На рис. 1.8 представлений варіант з другим ступенем знепилювання, в якій енергія закрученого потоку на виході з равликового апарату реалізується для сепарації частинок в прямоточному ступені. Апарат може бути використаний для знепилювання повітря в пневмотранспортній установці.

1.2. Результати патентного огляду існуючих конструкцій та методів знепилення повітря

При виконанні магістерської роботи був проведений патентний пошук і вибрано декілька конструкцій, котрі пізніше були взяті за основу для пропонованого проекту.

Наприклад, патент України UA 95941 C2 МПК B04C 5/181 (2006.01) B04C 5/13 (2006.01) B04C 5/14 (2006.01) Циклонний сепаратор, який має корпус (1), розвантажувальну трубу (5) і центральну трубу (3) для відведення газів, яка розташована аксіально у корпусі (1) та складається з множини сегментів (3а), які підвішені на опорному елементі (15), розташованому в зоні між корпусом (1) та розвантажувальною трубою (5), що має декілька підтримуючих засобів (17), які рівномірно розміщені та закріплені на внутрішньому боці корпусу (1) і/або розвантажувальної труби (5), і тим, що опорний елемент (15) включає кільцевий диск, який вільно лежить на підтримуючих засобах (17) та має зовнішній діаметр, який є меншим за внутрішній діаметр корпусу (1)

і/або розвантажувальної труби (5), тому є зазор (18) між кільцевим диском (15) та корпусом (1) і/або розвантажувальною трубою (5).

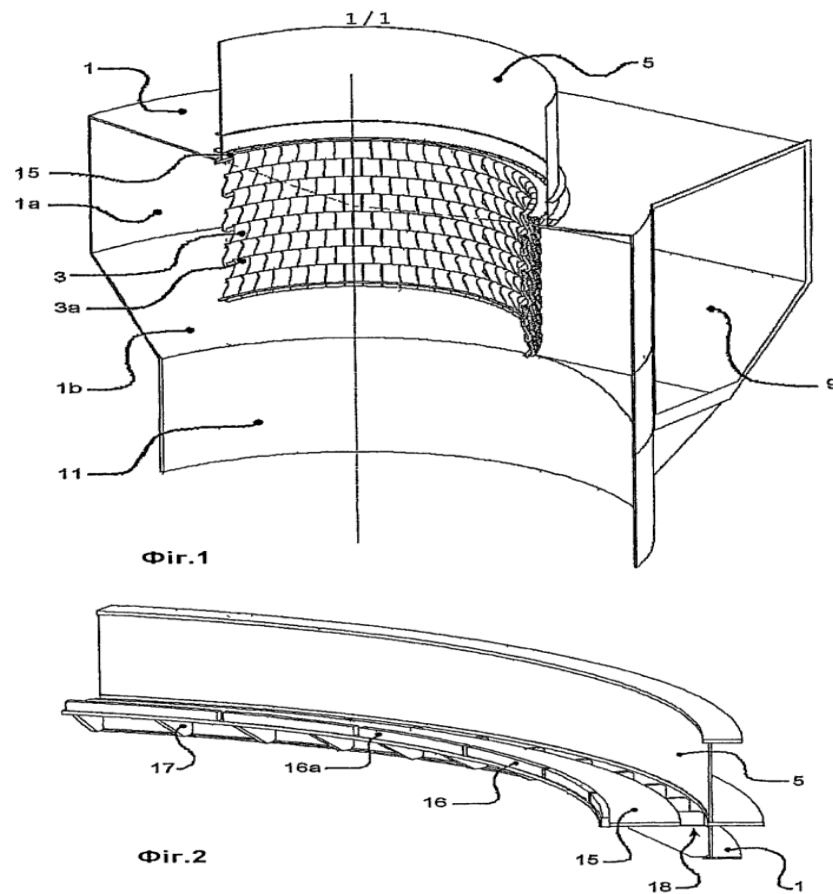


Рис.1.9. Циклонний сепаратор УКРАЇНА UA 95941 C2 МПК B04C 5/181 (2006.01) B04C 5/13 (2006.01) B04C 5/14 (2006.01) [32]

Проаналізувавши дану конструкцію було виявлено наступні недоліки :

1. Не враховується зміна гідравлічного опору від висоти опускання вихідного патрубку.
2. Не врахована зміна перерізу вихідного патрубку , що викликає зміну швидкості на ви виході з фільтру.

Наступна конструкція пропонованого фільтра-циклона за патентом УКРАЇНА UA 62949 U МПК (2011.01) B01D 36/00 B01D 50/00 B04C 9/00 має такі особливості:

Фільтр-циклон включає циклон, фільтр, який містить фільтруючий матеріал, пиловивантажувальний пристрій, патрубок вводу запиленого і патрубок відводу

очищеного повітря, який відрізняється тим, що він додатково містить повітро-розподільний механізм, при цьому циклон виконаний у вигляді колектора, а фільтр розміщений всередині циклонного колектора і виконаний у вигляді набору тканинних фільтрувальних рукавів, розміщених в корпусі. Фільтр-циклон який відрізняється також тим, що повітророзподільний механізм виконаний у вигляді набору укорочених сопел Вентурі, сполучених із системою електромагнітних клапанів, і накопичувачів стисненого повітря.

Серед недоліків даної конструкції можна зазначити високий гідравлічний опір газоповітряної суміші в циклоні, який підвищує зношування при роботі з абразивними видами пилу, що призводить до швидкого зношення циклону, а також вторинне винесення циклоном пилу у фільтр, що знижує ефективність вловлювання часток в циклоні та

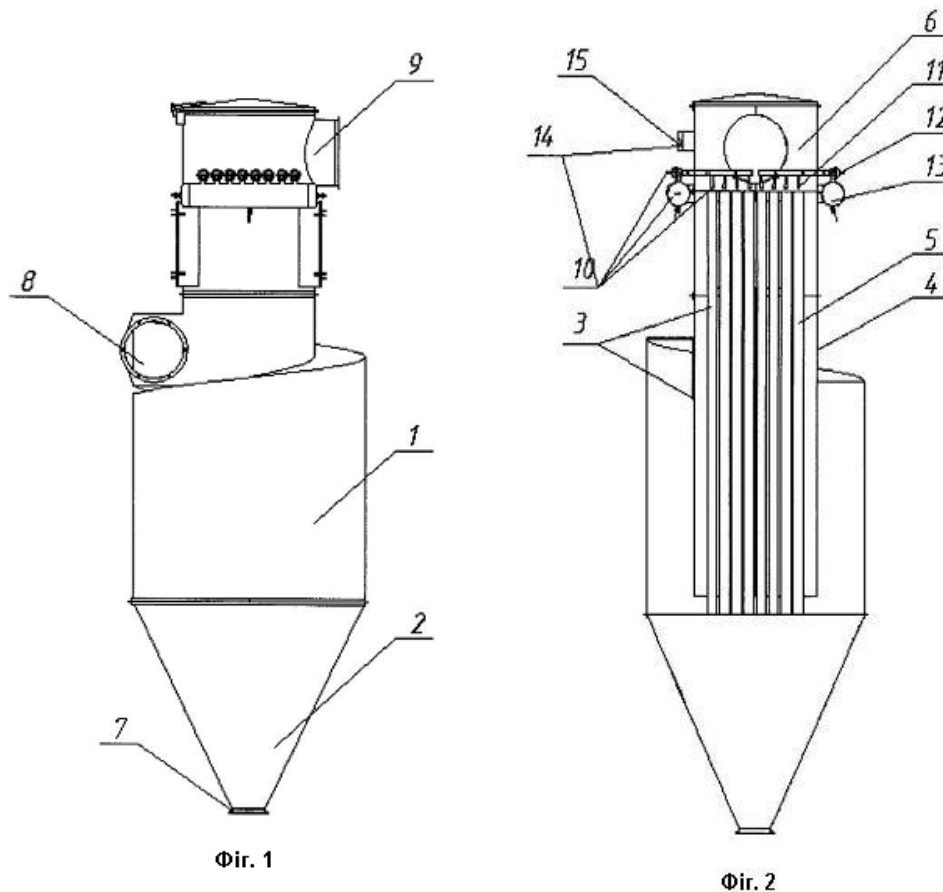


Рис.1.10. Конструкція фільтра-циклона за патентом УКРАЇНА UA 62949 U МПК (2011.01) B01D 36/00 B01D 50/00 B04C 9/00 [34]

збільшує час формування зернистого шару фільтрувальної частини на початковому етапі його формування.

Ще одним з ефективних технічних рішень щодо застосування циклонів є авторське свідоцтво СРСР № 793608, кл. В 01 D 45/00, 1981 (Батлук В.А. та ін.) [2], схема якого наведена на рис..

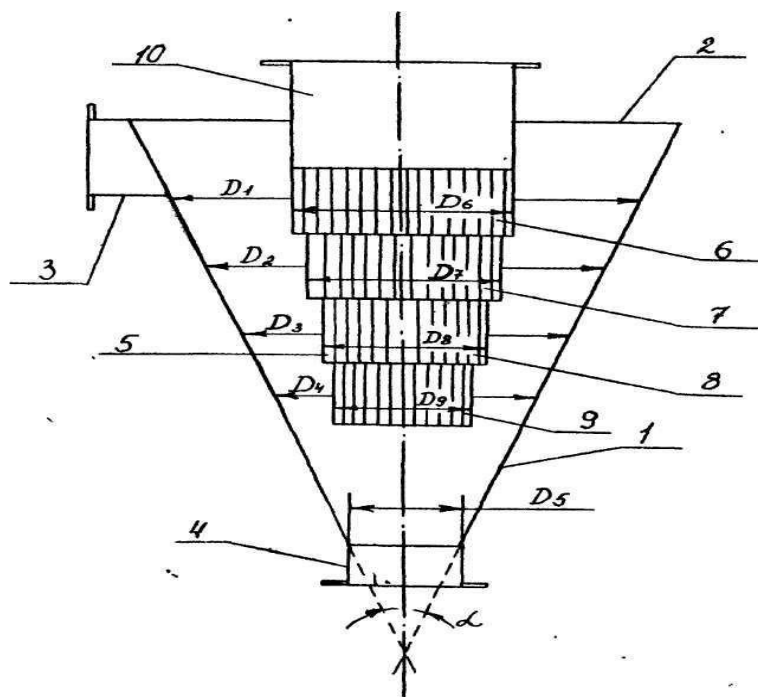


Рис.1.11. Пиловловлювач за а.с.СРСР 793608, кл. В 01 D 45/00, 1981 [2],

Він містить корпус з вхідним, вихідними пилевипускними патрубками та інерційним відділювачем, що відрізняється тим, що інерційний уловлювач виконаний ступінчасто, корпус виконаний у вигляді усіченого конуса з відношенням діаметра корпусу в середній частині кожної відповідної ступені інерційного відділу до діаметру ступені рівним 2,1-2,5. Він відрізняється ще й тим, що кут при вершині конуса, утворює корпус, становить 45° .

Недоліком даної конструкції можна вважати її вузьку специфіку використання, а також її високий гідравлічний опір.

1.3. Існуючі теорії в області циклонування

Термін «механічні осаджувачі» [9] зазвичай використовують для позначення пристроїв, в яких частинки осідають під дією яких сил тяжкості або інерції, або і тих і інших. У гравітаційних осаджувачів частинки осідають з потоку газу під дією власної ваги. В інерційних осаджувачів потік частинок, зважених в газі, раптово піддається зміні

напрямку руху, виникаючі інерційні сили прагнуть викинути частинки з потоку. Циклоні-осаджувачі, в яких використовується відцентрові сили інерції, є важливим випадком інерційних осаджувачів.

Швидкість видалення частинок пропорційна осаджуючій силі. Через дуже малу вагу дрібних частинок гравітаційне осадження виявляється занадто повільним і малоефективним процесом для частинок розміром менше 100 мкм. При використанні інерційного ефекту швидкість уловлювання різко підвищується. Завдяки цьому можна зменшити розмір обладнання та розширити діапазон ефективного уловлювання до частинок розміром близько 20 мкм. Для деяких циклонів граничний розмір вловлювання частинок становить 5 ... 10 мкм.

Для осадження під дією гравітації газ зазвичай просто повільно пропускають крізь велику камеру, причому частинки мають можливість осісти в бункер на дні. Відстань, необхідну для осадження частинок, можна зменшити шляхом поділу простору, тому камера може використовуватися лише з горизонтальними паралельними піддонами.

Гравітаційні камери можна постачати відбивними перегородками для зміни напрямку руху газу і залучення сил інерції для збільшення осаджувальної дії. В інших конструкціях для створення інерційного ефекту використовують заслінки, відбійники тощо. У циклонних осаджувачах газу надають обертального або вихрового руху, щоб піддати часткам впливу відцентрової сили інерції. Це досягається або тангенціальним введенням потоку до круглої камери, або пропусканням газу повз лопаті, радіально орієнтовані по відношенню до осі потоку.

Пристрої всіх цих типів характеризуються простотою конструкції і роботи. Вони відносно дешеві в порівнянні з іншими типами осаджувачів. Загалом вони не мають рухомих частин, а для забезпечення робочих умов можна використовувати будь-який матеріал. Витрати енергії на роботу також відносно малі, що обумовлено малим перепадом тиску під час протікання газу крізь пристрій.

Осаджувачі розглянутого типу використовуються для первинного видалення грубих частинок з газового потоку. У більшості випадків захисту повітря від забруднення потрібне вловлювання набагато більш дрібних частинок (розміром близько 1 мкм), тому зазвичай необхідно застосовувати осаджувачі інших типів. Однак механічні осаджувачі можна використовувати як попередні, розташовуючи їх послідовно з пристроями інших типів, щоб зменшити навантаження на останні. Це особливо необхідно при сильно запиленних газових потоках. Механічні осаджувачі можуть працювати довгий час без обслуговування з малими енергетичними витратами.

Виділення частинок із запиленого газу при його криволінійному русі широко поширене в практиці газоочищення. Є велика кількість публікацій з питання сепарації частинок газу з вкрапленнями, відома велика кількість пристроїв з прийнятними техніко-економічними показниками. Процес пиловідділення складається з декількох етапів: закручування потоку, концентрування і видалення частинок з сепараційної зони, формування шару в приймальнику, видалення уловленого пилу з приймача.

Порушення будь-якого з етапів призводить до незадовільної роботи пиловловлювача. Великого поширення набули апарати з додатковими (виносними) пристроями для осадження утворюється в них пилового концентрату. Вони компактні, дозволяють розміщувати виносний пристрій у зручному для вивантаження уловленого пилу місці. Як виносного пристрою найчастіше застосовують протипоточні циклони з власними приймачами пилу.

Відцентрові пиловловлювачі умовно можна розділити на апарати з підвищеною транспортною здатністю потоку концентрату пилу, в яких транспортна швидкість поблизу стінки дорівнює окружній швидкості потоку (спірально-вихрові апарати), апарати, в яких швидкість транспортування концентрату частинок до пилевідвідного каналу порівнянна з окружною швидкістю потоку (ротоклони, прямоточні циклонні пиловідокремлювачі), і апарати, в яких швидкість транспортування концентрату частинок до пилевідводного каналу набагато нижче тангенціальної швидкості (високоєфективні протипоточні циклони).

В умовах виробництва пиловловлювачі працюють в інших, ніж при випробувальних лабораторіях умовах. У практиці апарати працюють в умовах абразивного зносу, залипання та зависання пилу, вільноутворення в вивантажувальних пристроях, змін умов сепарації при нестаціонарності концентрацій пилу в потоках. Існує велика різноманітність відцентрових пиловловлювачів. Вибір здійснюється на основі експериментальних, експлуатаційних даних застосування апаратів.

1.4.Методи дослідження циклонів

Циклони вибирають за розрахунками продуктивності апарату [7] і швидкості газу при вході до циклону із забезпеченням необхідної ефективності очищення при мінімальних енергетичних витратах (тобто при мінімальному гідравлічному опорі). Швидкість запиленого потоку на вході в циклон повинна бути не нижче транспортної швидкості, несучої частинки пилу. При зниженні цієї швидкості виникають відкладення пилу на стінках газоходу і у вхідному патрубку циклону. У таблиці 1.1 представлена

швидкість на виході для деяких видів циклонів при однаковій швидкості на вході - 18 м / с.

Таблиця 1.1. Швидкість на виході з деяких циклонів :

Тип циклона	Скорость газа на входе в циклон м/сек	Скорость газа на выходе из циклона м/сек
ЦН-15	18	11
ЦН-24	18	18,4
ВЦНИИОТ	18	23

Загальний гідравлічний опір циклона дорівнює :

$$\Delta P_{\text{ц}} = \zeta_{\text{вх}} \frac{v_{\text{вх}}^2 \rho}{2},$$

Де $v_{\text{вх}}$ — швидкість потоку у входному патрубку, м/с; $\zeta_{\text{вх}}$ — коефіцієнт гідравлічного опору циклону; ρ — густина газу.

Іноді загальний гідравлічний опір циклону визначають також за умовною швидкістю газу в циклоні, віднесеною до площі живого перетину циліндричної частини циклона

$$\Delta P_{\text{ц}} = \zeta_0 \frac{v_0^2 \rho}{2},$$

де v_0 — умовна швидкість газу в циклоні, м/с. Зазвичай v_0 знаходиться в межах 3 – 3,5 м/с. ζ_0 — коефіцієнт гідравлічного опору циклону віднесений до швидкості в повному перерізі апарату.

Для більшості видів циклонних апаратів коефіцієнти $\zeta_{\text{вх}}$ та ζ_0 постійні, та не залежать від числа Re. Значення цих коефіцієнтів найбільш часто зустрічаються у видів циклонів, наведених нижче. В значення коефіцієнта гідравлічного опору циклонів НИИОГазу вносять зміни, котрі враховують діаметр циклону і запиленість повітря при вході в циклон : $\zeta = K_1 K_2 \zeta_{\text{табл}}$, де K_1 — поправочний коефіцієнт на діаметр циклона, K_2 — поправочний коефіцієнт на діаметр циклона, а $\zeta_{\text{табл}}$ — коефіцієнт місцевого опору циклону, визначений за табл. 1.3

Таблиця 1.2. Коефіцієнти гідравлічного опору циклонів:

Тип циклона	Діаметр, мм.	ζ_{ex}	ζ_o
ЦН-11	450	6,1	250
ЦН-15	450	7,6	160
ЦН-15у	450	8,2	170
ЦН-24	450	10,9	80
СИОТ		6,0	
ВЦНИИОТ	370	9,3	
ЛИОТ	700	4,2	460
ЦКК		5,2	
РЦ		5,0	
ЦВР		9,6	

Таблиця 1.3. Значення поправочного коефіцієнта K_1 на діаметр циклону

Діаметр циклона, мм.	ЦН-11	ЦН-15; ЦН-15у; ЦН-24	СДК-ЦН-33; СДК-СН-34
150	0,94	0,85	1,00
200	0,95	0,90	1,00
300	0,96	0,93	1,00
450	0,99	1,00	1,00
500	1,00	1,00	1,00

Таблиця 1.4. Значення поправочного коефіцієнта K_2 на запиленість (при D=500мм)

Тип циклона	Поправочный коэффициент K_2 при запыленности, г/м ³						
	0	10	20	40	80	120	150
ЦН-11	1,00	0,96	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
ЦН-15	1,00	0,93	0,92	0,91	0,90	0,87	0,86
ЦН-15у	1,00	0,93	0,92	0,91	0,89	0,88	0,87
ЦН-24	1,00	0,95	0,93	0,92	0,90	0,87	0,86
СДК-ЦН-33	1,00	0,81	0,785	0,78	0,77	0,76	0,745
СДК-ЦН-34	1,00	0,98	0,947	0,93	0,915	0,91	0,90

Розрахунок циклонів проводиться за наступними даними:

Витрата газу, що підлягає очищенню при робочих умовах, Q_p , м³/с.

щільність газу в робочих умовах ρ_r , кг/м³.

Температура газу, Т, К.

Динамічна в'язкість газу при даній температурі, μ_r , Па * с.

Дисперсний склад пилу, який задається двома факторами:

Середній розмір пилу (такий розмір пилу, при якому кількість частинок, крупніше цього розміру дорівнює кількості частинок дрібніше його), d_m .

Середнє квадратичне відхилення у функції розподілу часток за розмірами, $lg\sigma_q$.

Вихідна запиленість газу $C_{вх}$, г/м³.

Необхідна запиленість газу $C_{вих}$, г/м³..

Щільність пилу, ρ_q , кг/м³.

Розрахунок роблять у такий спосіб

Обчислюють необхідну ефективність очищення газу:

$$\varepsilon = \frac{C_{вх} - C_{вих}}{C_{вх}}$$

Задаються типом циклона. За таблицею 1.1 визначають швидкість газу в апараті, $v_{опт}$.

Визначають необхідну площу циклону, м²:

$$F = \frac{Q_p}{v_{опт}}$$

Задаються кількістю циклонів N , і визначають діаметр циклона, м :

$$D = \sqrt{\frac{F}{0.785 * N}}$$

Визначають дійсну швидкість газу в циклоні :

$$v = \frac{Q_p}{0.785 * N * D^2}$$

Дійсна швидкість газу не повинна відрізнятися від оптимальної більш, чим на 15%

Приймають за таблицею 1.2 коефіцієнт гідравлічного опору для даного циклону. Для циклонів НПОГАЗ вносять поправки на діаметр циклону і запиленість за таблицями 1.2 і 1.3 відповідно.

Визначають втрати тиску в циклоні, Па, за формулою:

$$\Delta P = \zeta_0 \frac{\rho_g v^2}{2}$$

Якщо втрати цілком прийнятні, переходять до визначення ефективності очищення газу в циклоні. Приймавши за таблицею 1.4 значення d_{50}^T та $lg\sigma_q^T$ для табличних умов (дані таблиць отримані експериментальним шляхом) визначають значення d_{50} при робочих умовах (діаметрі циклону, швидкості потоку, густині пилу, динамічній в'язкості газу) по рівнянню, отриманому із критеріїв Стокса, розглянутого в діапазоні стоксовського закону опору середовища:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\frac{D}{D_T} \frac{\rho_{\text{чТ}}}{\rho_{\text{ч}}} \frac{\mu}{\mu_{\text{ч}}} \frac{v_T}{v}}.$$

Визначають параметр x по формулі:

$$x = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\lg^2 \sigma_T + \lg^2 \sigma_{\text{ч}}}.$$

По графіку (рис. 1.12) визначають значення функції $\Phi(x)$, і знаходять ефективність циклону η :

$$\eta = 0,5(1 + \Phi(x)).$$

Отримане значення зрівнюють з необхідним. Якщо воно менше, ніж потрібне, то приймають інший циклон, і розраховують його аналогічним чином. Зміна одного типу циклону на інший, при умовах збереження опору газового тракту постійним, проводиться за рахунок зміни діаметра циклону.

Діаметр нового циклону в цьому випадку визначається із наступної формули

$$D_2 = D_1 \sqrt[4]{\frac{\zeta_{02}}{\zeta_{01}}},$$

де D_2 – діаметр нового циклону; D_1 – діаметр старого циклону.

Крім того, для циклонів НПОГаз існують монограми для визначення ефективності циклонів ЦН-15, ЦН-24 в залежності від d_{50} та $\lg \sigma_{\text{ч}}$. Цей та інші способи визначення ефективності циклона наведені для визначення загальної степені очистки в циклоні, починаючи $\epsilon = 50\%$ та вище. Однак вони виключають можливість теоретичного розрахунку ступеню очистки циклона за фракціями.

Таблиця 1.5. Параметри, що визначають ефективність циклону

Параметры	ЦН-24	ЦН-15у	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СДК-ЦН-34	СИОТ	ВЦНИИ ОТ
d_{50}^T , мкм.	8,5	6,0	4,5	3,65	2,31	1,13	2,6	8,6
$\lg \sigma_{\text{ч}}^T$	0,308	0,283	0,352	0,352	0,364	0,340	0,28	0,32
$v_{\text{отм}}$, м/с.	4,5	3,5	3,5	3,5	2,0	2,0	1,0	4,0
Примітка: Значення d_{50}^T в таблиці відповідає наступним умовам експлуатації циклонів: середня швидкість газу в циклоні $v = 3.5$ м/с; діаметр циклона $D = 600$ мм; густина часток $\rho = 1930$ кг/м ³ ; динамічна в'язкість газу $\mu_r = 22,2 \cdot 10^{-6}$ Па*с.								

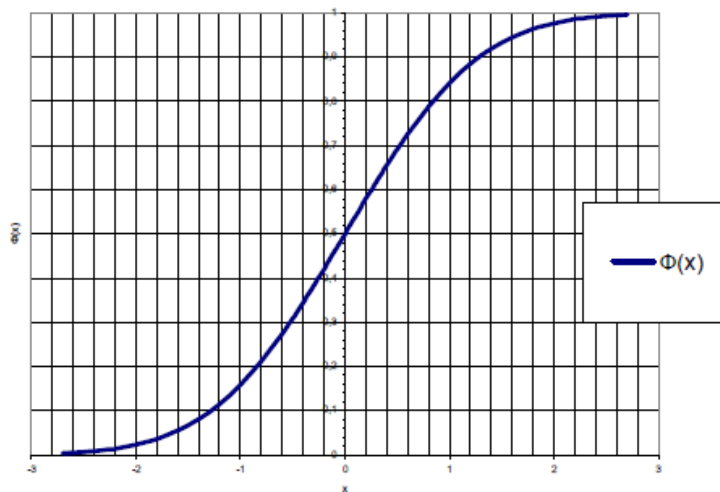


Рис.1.12 Значення функції $\Phi(x)$

1.5. Постановка задачі, мета, завдання дослідження

Мета роботи полягає в удосконаленні експлуатаційних характеристик циклона для підвищення його очисної здатності, що дозволить тим самим підняти ступінь очистки у промислових системах очищення повітря.

Для досягнення мети потрібно було розв'язати такі основні *завдання*:

1. Проаналізувати результати останніх досягнень у галузі повітроочищення на підприємствах та обґрунтувати потребу проведення теоретичних та експериментальних досліджень.
2. Побудувати математичну модель потоків повітря в циклоні.
3. Вивчити вплив конструкційних елементів циклона на гідравлічний опір та ефективність апарата.
4. Розробити конструкцію циклона та підтвердити її ефективність у промислових умовах.

РОЗДІЛ 2. ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ЦИКЛОНА

2.1. Розробка фізичної моделі циклона

В основу конструкції циклона для очистки промислового повітря поставлено завдання створення такого пиловловлювача, в якому підвищення ефективності роботи досягається за рахунок збільшення степені очистки повітря, яке, обертаючись, виходить в атмосферу крізь вихлопну трубу циклона, одночасно не знижуючи швидкості потоку у циліндричній та конічній частині апарата у зовнішньому вихорі.

Завдання вирішується тим, що в пиловловлювачі встановлюється всередину по контуру циліндричної поверхні на відстані 10 мм напрямна сітка, площа фільтрувальної поверхні якої підібрана таким чином, що крізь неї в атмосферу потрапляє частина загальної продуктивності циклона.

На рисунку 2.1 схематично зображено запропонований циклон. Він містить: тангенціальний вхідний патрубок 1, циліндричну 2 та конічну 3 частини, вихлопну трубу 4 та бункер 5, в середині циліндричної поверхні встановлена фільтруюча сітка 6.

Пиловловлювач працює таким чином: пилоповітряна суміш крізь вхідний патрубок 1 потрапляє у циліндричну частину 2 апарата і починає обертатися навколо його осі. Одночасно з обертанням потік здійснює поступальний рух зверху вниз до конічної частини 3, в якій відбувається його розподіл на два потоки. Перший здійснює поворот на 180 градусів і, продовжуючи обертатися, підіймається знизу вверх, потрапляє у вихлопну трубу 4, крізь яку виходить у атмосферу. Другий потік, збагачений вловленими частинками пилу, продовжує рух зверху вниз і потрапляє до бункера 5.

Співвідношення розмірів окремих елементів циклона вибирається таким чином, що у бункері 5 циклона, який встановлений на нагнітальній стороні вентилятора, статичний тиск є вищим за атмосферний. Фільтрувальна сітка встановлена у циліндричній частині фільтру не дає можливості першому потоку підхоплювати в себе частки пилу, що несе у собі інший потік. Решта потоку підіймається знизу вверх та приєднується до внутрішнього вихору, який піднімається, і виводиться з ним назовні.

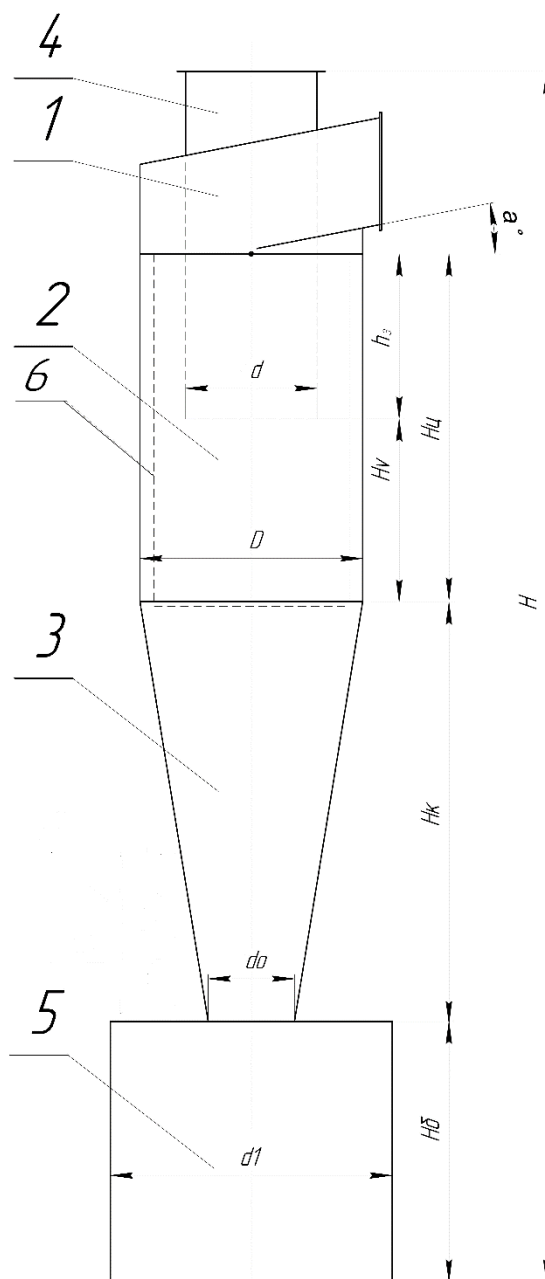


Рис.2.1. Схематичне зображення параметрів циклону за методикою Л.М.Дорундяк

Така конструкція пиловловлювача забезпечує зниження кількості повітря у внутрішньому потоці, який направлений знизу вгору, що у свою чергу приводить до зниження гідравлічного опору циклона та підвищення ефективності процесу повітроочищення. Швидкості повітря у зовнішньому вихорі не знижуються у порівнянні зі звичайним циклоном.

На основі співвідношень геометричних розмірів циклона (таблиця 2. 1) можуть бути розроблені циклони для очистки промислового повітря довільних діаметрів. Відповідно до ГОСТ9617–67 для циклонів можуть бути прийняті такі діаметри: 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000, 2400, 3000.

В таблиці 2.1 представлено значення основних геометричних розмірів циклонів для очистки промислового повітря . Циклони можуть виконуватися лівого і правого виконання.

Таблиця 2.1 – Конструкційні розміри циклона (в мм)

D	$H_{ц}$	h_z	H_k	d_0	h_t	a	b	l	d_l	H_b	d_{ϕ}	H_{ϕ}	H
200	400	140	400	80	200	132	40	120	300	200	60	140	1060
300	600	210	600	120	300	198	60	180	450	300	90	210	1590
400	800	280	800	160	400	264	80	240	600	400	120	280	2120

500	1000	350	1000	200	500	330	100	300	750	500	150	350	2650
600	1200	420	1200	240	600	396	120	360	900	600	180	420	3180
700	1400	490	1400	280	700	462	140	420	1050	700	210	490	3710
800	1600	560	1600	320	800	528	160	480	1200	800	240	560	4240
900	1800	630	1800	360	900	594	180	540	1350	900	270	630	4770
1000	2000	700	2000	400	1000	660	200	600	1500	1000	300	700	5300

2.2. Обґрунтування конструктивних параметрів

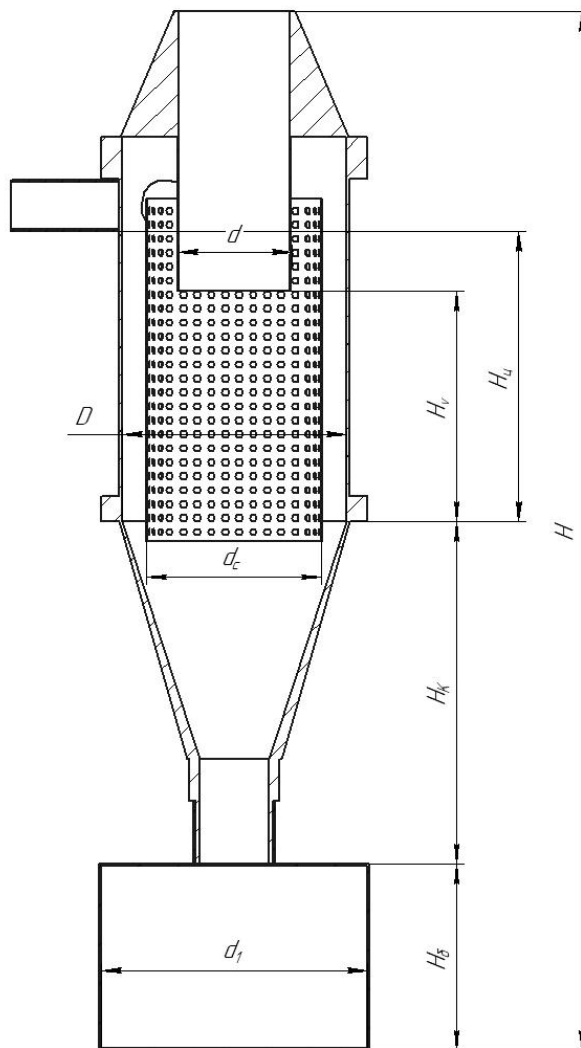


Рис 2.2 Схема розробленого агрегату

При створенні даного агрегату(рис.2.2) було взято за основу фільтр циклонного типу ЦН-15. Серед найбільш відомих – конструкції ЦН-11, ЦН-15, ЦН-15у, ЦН-24. Це високопродуктивні апарати, які забезпечують осідання частин діаметром 10 мкм з ефективністю не вище 80 %. Найкраще зарекомендували себе ЦН-11 та ЦН-15. При однаковій ефективності найбільш високі технічно-економічні показники мають циклони ЦН-11. Циклони типу ЦН-15 відрізняються меншими габаритами, більш стійкою роботою з липким пилом, тому їхня експлуатація виправдана при очищенні повітря з високою концентрацією дрібнодисперсного або вловлюванні середньо- та

сильнолипкого пилу. При невисоких вимогах до ступеня очищування повітря від пилу з середнім медіанним діаметром 20 мкм переважно використовують циклони типу ЦН-24. При великих витратах газів і високій концентрації пилу в газовому потоці застосування циклонів типу ЦН-24 може бути рекомендовано як першу ступінь очищування перед апаратами, що забезпечують високу ефективність. Конструкція циклона ЦН-15 вважається найбільш дослідженою .

Також за рахунок установлення прямої сітки в середину циліндричної частини фільтру ми домоглися більш високої ступені очистки повітря без змін габаритних розмірів самої конструкції. В даному патенті також була поставлена фільтруюча сітка, але нами було вирішено поставити сітку іншого типу та на іншій відстані для дослідження такого положення та типу сітки на аеродинамічні показники фільтру. Ідея була в тому, щоб фільтруюча сітка пропускала повітря у одному напрямку та створювала супротив для підхоплювання часток , що були за рахунок відцентрових сил інерції відсіяні не підхоплювалися потоком та не потрапляли у повітряний потік , що йде на вихід.

Циклони ЦН-15 призначені для сухого очищення газів, що виділяються при деяких технологічних процесах (сушка, випалення, агломерація, спалювання палива і т.д.), а також очищення аспіраційного повітря. Застосовуються на підприємствах чорної і кольорової металургії, хімічної, нафтової та машинобудівної промисловості, промисловості будівельних матеріалів, в енергетиці тощо, Застосування циклонів типу ЦН-15 неприпустимо в умовах вибухонебезпечних середовищ; не рекомендується їх застосовувати також для уловлювання сильно-злипаються пилу, особливо при малих діаметрах циклонів. Залежно від продуктивності по газу і умов застосування циклони виготовляють одиночного виконання (внутрішній діаметр від 300 до 1400 мм) або групового виконання - з двох, чотирьох, шести і восьми циклонів однакового внутрішнього діаметра (від 300 до 1000 мм). Циклони групового виконання виготовляють з «лівим» і «правим» обертанням газового потоку, поодинокі - тільки з «правим» обертанням. Залежно від компоновки групі циклони можуть бути з камерою очищеного газу у вигляді «равлика» або у вигляді збірки, а поодинокі - тільки з «равликом». Бункери циклонів - пірамідальної форми. При роботі циклонів повинна бути забезпечена безперервне вивантаження пилу. При цьому рівень пилу в бункерах повинен бути не вище площини, розташованої від кришки бункера на 0,5 діаметра циклону. У технічній характеристиці наведені значення продуктивності, віднесені до швидкості в циліндричній частині циклона $v = 2,5$ і $3,5$ м / с. У звичайних умовах оптимальною

вважається швидкість 3,5 м / с. Швидкість 2,5 м / с рекомендується приймати при роботі з абразивним пилом.

Залежно від температури навколишнього середовища циклони виготовляють з вуглецевої сталі (при температурі до -40°C) і низьколегованої сталі (при температурі нижче -40°C). Виготовлення та поставка - по ОСТ 26-14-1268-75

2.3. Аеродинамічний розрахунок циклону

Для ефективного конструювання циклона існує нагальна потреба вивчення особливостей проходження повітря у порожнині конструкції[4]. Для проведення розрахунків необхідно встановити певні граничні та початкові дані:

1) кількість газу, що очищається при робочих умовах

$$Q_p = 13800 \text{ м}^3 / \text{г} = 3,834 \text{ м}^3 / \text{с};$$

2) щільність газу при робочих умовах $\rho_r = 1,3 \text{ кг} / \text{м}^3$;

3) динамічна в'язкість газу при робочій температурі $\mu_t = 22,2 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$;

4) дисперсний склад пилу, що задається двома параметрами $d_m = 5 \text{ мкм}$ і $\lg \sigma_q = 0,352$;

5) запиленість газу $C_{\text{вх}} = 23 \text{ г} / \text{м}^3$;

6) щільність частинок $\rho_q = 1340 \text{ кг} / \text{м}^3$;

7) необхідна ефективність очищення газу $\eta = 70\%$.

Розрахунок циклонів проводиться методом послідовних наближень в наступному порядку (по «Довідник по пило-та золоуловлювання» під заг. ред. Русанова А.А.).

1. Поставивши типом циклону (ЦН-15), по таблиці 2.2 визначаємо оптимальну швидкість газу в апараті $\omega_{\text{опт}} = 3,5 \text{ м} / \text{с}$.

Таблиця 2.2 – Оптимальна швидкість газу

Тип циклону	ЦН-24	ЦН-15	ЦН-11	СДК-ЦН-33	СК-ЦН-34
$\omega_{\text{опт}} \text{ м/с}$	4,5	3,5	3,5	2,0	1,7

2. Визначаємо необхідну площу перерізу циклону, м^2 :

$$F = \frac{Q_p}{\omega_{\text{opt}}} = \frac{3,834}{3,5} = 1,09$$

3. Визначаємо діаметр циклону, задаючись кількістю циклонів $N = 1$, м:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785N}} = \sqrt{\frac{1,09}{0,785 \cdot 2}} = 0,83$$

Діаметр циклону округлюємо, в даному випадку $D = 0,8$ м.

4. Обчислюємо дійсну швидкість газу в циклоні, м / с:

$$\omega = \frac{Q_p}{0,785ND^2} = \frac{3,834}{0,785 \cdot 2 \cdot (0,8)^2} = 3,81$$

Швидкість газу в циклоні не повинна відхилятися від оптимальної більш ніж на 15%.

5. Приймаємо коефіцієнт гідравлічного опору, який відповідає цьому циклону:

$$\zeta_{\text{ц}500}^{(n)} = 165 \quad .$$

K_1 - поправний коефіцієнт на діаметр циклону, що визначається за таблицею:

$$K_1 = 1;$$

K_2 - поправочний коефіцієнт на запиленість газу, що визначається за таблицею:

$$K_2 = 0,92;$$

K_3 - коефіцієнт, що враховує додаткові втрати тиску, що визначається за таблицею:

$$K_3 = 35$$

$$\zeta = K_1 * K_2 * \zeta_{\text{ц}500}^{(n)} + K_3 = 1 * 0,92 * 165 + 35 = 186,8$$

6. Визначаємо втрати тиску в циклоні, Па:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho \omega^2}{2} = 186,8 * \frac{1,3 * (3,81)^2}{2} = 1760,65$$

7. Приймавши по таблиці два параметри, що характеризують ефективність обраного типу циклону, визначаємо значення параметра d_{50} при робочих умовах (діаметр циклону, швидкість потоку, щільність пилу, динамічна в'язкість газу) за рівнянням:

$$d_{50} = d_{50}^T \sqrt{\left(\frac{D}{D_T}\right) * \left(\frac{\rho_q}{\rho_r}\right) * \left(\frac{\mu}{\mu_T}\right) * \left(\frac{\omega_T}{\omega}\right)} = 4.5 * \sqrt{\frac{0.8}{0.6} * \frac{1930}{1340} * \frac{22.2 * 10^{-6}}{22.2 * 10^{-6}} * \frac{3.5}{3.81}} = 5.94$$

8. Визначаємо параметр X за формулою:

$$X = \frac{\lg \frac{d_m}{d_{50}}}{\sqrt{\lg^2 \sigma_\eta + \lg^2 \sigma_q}} = \frac{\lg \frac{5}{5.94}}{0.352} = -0.21$$

9. Визначаємо значення $\Phi(X)$, що представляє собою повний коефіцієнт очищення газу, виражений в частках:

$$\Phi(-0.21) = 0.4207$$

10. Фактична ступінь очищення, %:

$$\eta = 50[1 + \Phi(x)] = 50[1 + 0.4207] = 71.03$$

Для орієнтовних розрахунків необхідного значення $\zeta_{ц}$ використовується наступна залежність:

$$\zeta_{ц2} = \zeta_{ц1} * \left[\frac{100 - \eta_p}{100 - \eta_2}\right] * \frac{\omega_1}{\omega_2} * \frac{D_2}{D_1} = 177.6 * \left[\frac{100 - 70}{100 - 71.03}\right] * \frac{3.5}{3.81} * \frac{0.8}{0.6} = 221.39$$

де індекс 1 - відноситься до розрахункових, а індекс 2 - до необхідних значень параметрів циклону.

Для проектування і побудови циклони необхідні розміри. Для отримання розмірів використовуємо табл. 2.1 "Співвідношення розмірів (в частках внутрішнього діаметру)", мм:

Внутрішній діаметр вихлопної труби d - 472;

Внутрішній діаметр пиловипускного отвору d_1 - 240;

Ширини вхідного патрубку в циклоні на вході (внутрішній розмір) b_1 - 160;

Довжина вхідного патрубку l - 480;

Діаметр середньої лінії циклону $D_{ср}$ - 640;

Висота установки фланця $h_{фл}$ - 80;

Кут нахилу кришки і вхідного патрубку циклона α - 15°;

Висота вхідного патрубку a - 528;

Висота вихлопної труби h_T - 1200;

Висота циліндричної частини циклона $H_{\text{ц}}$ - 1208;

Висота конуса циклону H_k - 1200;

Висота зовнішньої частини вихлопної труби h_b - 240;

Загальна висота циклону H - 2648.

Відповідно до рекомендацій методики [13], визначення гідравлічного опору пиловловлювача проводили на незапиленому повітрі у такій послідовності:

1. Проводились вимірювання: температури повітря за допомогою лабораторного ртутного термометра; відносної вологості повітря за допомогою аспіраційного психрометра; атмосферного тиску за допомогою метеорологічного барометра-анероїда.
2. Відповідно до описаної вище методики проводили вимірювання продуктивності у трубопроводі та приводили її значення до нормальних умов.
3. За допомогою пневмометричної трубки Піто - Прандтля і мікропроцесорного приладу TESTOVENT визначали значення повного тиску на прямолінійній ділянці трубопроводу перед циклоном та після нього. Довжина такої ділянки до пневмометричної трубки дорівнювала 20 діаметрів, а за трубою 15 діаметрів повітропроводу.
4. Відповідно до роботи [13] гідравлічний опір визначали як пропорційний різниці повного тиску перед і після циклону.

2.4. Висновки за розділом 2.

1. Розглянуті питання створенню фізичної моделі по розробленій конструкції, на основі аналізу патентів та недоліків сучасних апаратів пилоочистки, та циклонних апаратів.
2. Обґрунтовано конструктивні параметри розробленої конструкції, а також описана сама конструкція.
3. Проведений аеродинамічний розрахунок конструкції.

РОЗДІЛ 3. ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ЦИКЛОНУ

3.1 Напрямок та об'єкт дослідження

До основних параметрів, які характеризують роботу циклона належать:

- продуктивність;
- ефективність, або коефіцієнт корисної дії (ККД);
- гідравлічний опір.

Під продуктивністю циклона Q розуміють кількість повітря, що очищується під час його проходження крізь циклон за одиницю часу. Одиниці вимірювання цієї величини: $\text{м}^3/\text{с}$. Найчастіше значення продуктивності визначають як добуток значення швидкості потоку повітря у вхідному патрубку циклона та площі поперечного перерізу патрубка. Крім того, кожна конструкція циклона характеризується рекомендованими значеннями швидкості потоку повітря у вхідному патрубку циклона та фіктивною швидкістю, під якою розуміють відношення продуктивності апарата до площі поперечного перерізу радіального зазору.

Ефективність η процесу очищування пило повітряної суміші (коефіцієнт корисної дії апарата або ефективність циклона) визначено як відношення ваги вловленого $G_{\text{вх}} - G_{\text{вих}}$ до ваги пилу, що надійшов у циклон $G_{\text{вх}}$:

$$\eta = \frac{G_{\text{вх}} - G_{\text{вих}}}{G_{\text{вх}}} \cdot 100\%, \quad (3.1)$$

де $G_{\text{вх}}$ і $G_{\text{вих}}$ – відповідно вага пилу на вході та виході з циклона.

Втрати тиску на гідравлічному опорі або гідравлічні втрати тиску (надалі називатимемо гідравлічним опором циклона і позначатимемо Δp) визначено пропорційним різниці повних тисків на його вході та виході. Загалом він залежить від швидкості потоку повітря у вхідному патрубку апарата. Для кожної конструкції циклона таку залежність досліджують експериментально. Внаслідок вимірювань одержують графічну залежність (рис. 2.1), яку називають аеродинамічною характеристикою циклона.

Загальне емпіричне рівняння спаду тиску ΔP в циклоні:

$$\Delta P = \zeta_c \cdot \rho \cdot \frac{V_i^2}{2}, \quad (3.2)$$

де V_i – швидкість потоку у вхідному патрубку циклона, ζ_c – коефіцієнт гідравлічного опору, ρ – густина повітря.

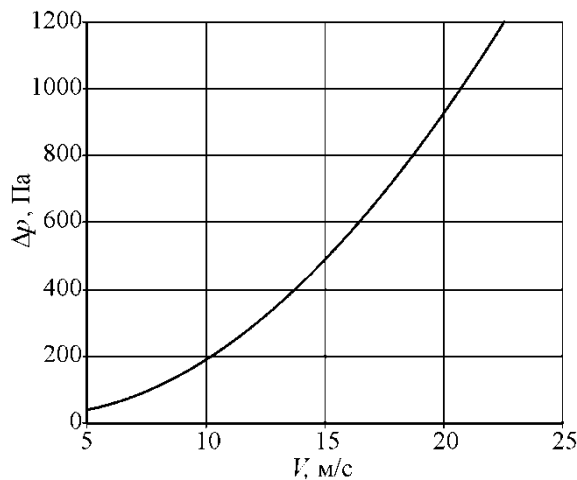


Рисунок 3.1 – Аеродинамічна характеристика циклона ЦН-15

Коефіцієнт гідравлічного опору ζ_c є одним з основних показників, що характеризують енергоємність процесу очищення пило повітряної суміші в циклоні. Для кожної конструкції сепаратора його визначають експериментальним шляхом. В роботах[22] описано емпіричні рівняння для знаходження ζ_c :

$$\xi = X \cdot \left(\frac{A_i}{D_c^2} \right)^z, \quad (3.3)$$

де X і Z – функції геометрії циклона, A_i , D_c – відповідно площа вхідного патрубка і діаметр вихлопної труби.

Експериментальні заміри показали, що результати теоретичного визначення об'єктивних технічних параметрів циклонів (ефективності та гідравлічного опору) дають тільки наближені до реальних значення. Перш за все, це пов'язано з надзвичайно складними аеродинамічними процесами, що відбуваються всередині апарата. Точний результат може бути одержаний тільки експериментальним шляхом для кожної конструкції циклона [5].

Окрім названих основних характеристик циклона розглядають й інші параметри, які характеризують процес очищування запиленого повітря в апараті. До них належать: витрати електроенергії, вартість очищення, металоємність, стійкість до абразивної дії запиленого потоку повітря, що визначає довговічність роботи апарата. Абразивне

зношення виникає внаслідок скупчення частинок поблизу стінки циклона та їх динамічної взаємодії.

Для побудови математичних моделей уловлення матеріальних частинок в циклонах часто застосовують такі характеристики: $d_{кр}$ – критичний діаметр частинок, які будуть вловлені в циклоні та d_{50} – діаметр частинок, ймовірність уловлення яких складає 50%.

В основі «методу оцінки циклона» є два основних принципи, що застосовують при розрахунках пиловловлювачів. Перший – це припущення про те, що розподіл фракційних ефективностей відцентрового пиловловлювача описується логарифмічно нормальним законом розподілу, тобто може бути охарактеризований двома параметрами: d_{50} – діаметром частинок, ймовірність уловлення яких складає 50%, і $lg \sigma_\eta$ – середнім квадратичним відхиленням функції розподілу фракційних ефективностей. Другий – перерахунок параметра за d_{50} умов ρ_n , W_z , μ_z , D_u на дійсні умови роботи циклона ρ_n^* , W_z^* , μ_z^* , D_u^* , здійснюється на основі рівності критеріїв Стокса за формулою:

$$d_{50}^* = d_{50} \cdot \sqrt{\frac{\rho_n}{\rho_n^*} \cdot \frac{W_z}{W_z^*} \cdot \frac{\mu_z^*}{\mu_z} \cdot \frac{D_u}{D_u^*}}, \quad (3.4)$$

де ρ_n – густина частинки пил, кг/м^3 ; W_z – швидкість газу в циліндричному перерізі циклона, м/с ; μ_z – динамічна в'язкість газу, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Внаслідок проведених розрахунків зроблено висновок про те, що коефіцієнт гідравлічного опору циклона можна знаходити за такою формулою:

$$d_{50}^* = 64,35 \cdot \xi^{-0,511}; \quad \xi = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_z \cdot W_u^2}, \quad (3.5)$$

де Δp – втрати тиску Δp на гідравлічному опорі, Па , ρ_z – густина газу, кг/м^3 .

Під час розроблення нових конструкцій циклонів не слід надмірно підвищувати їх гідравлічний опір тому, що зменшення значення d_{50} є незначним. Зменшення значення ξ призводить до значного погіршення показника d_{50} .

При випробуваннях нових конструкцій циклонів, для забезпечення об'єктивного оцінювання, рекомендовано використовувати нормативний документ, де визначено правила і методи проведення досліджень. Таким документом вважають „Єдину методіку порівняльних досліджень пиловловлювачів для очищування вентиляційного повітря”[14]. Проте дана методика зорієнтована на випробування циклонів з використанням

стандартного пилю – кварцового піску. Проводити очищування повітря від кварцового піску з допомогою циклонів, на думку автора, недоцільно. Тому рекомендовано методики та алгоритми проведення основних випробувань циклонів.

В циклонах зазвичай досліджують такі параметри:

- 1) втрати тиску Δp на гідравлічному опорі (який надалі називатимемо гідравлічним опором апарата) (Па);
- 2) ефективність η (%).
- 3) розподіл швидкості потоку повітря та статичного тиску.

3.2. Експериментальний стенд для дослідження характеристик циклона

Для проведення експериментальних досліджень був розроблений спеціальний стенд (рис. 3.2). За його основу прийнятий стенд для випробування сухих циклонів, які встановлені на нагнітальному боці мережі. Дослідження виконувалися відповідно до рекомендацій, які були описані в роботах [1, 8, 10, 13, 15, 21, 28, 29].

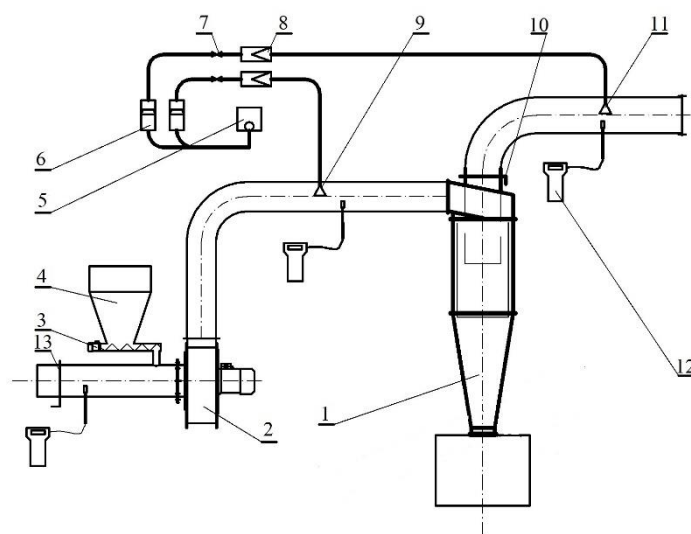


Рис. 3.2. Схема стенду для випробування циклонів

1 – циклон; 2 – вентилятор ВРП №3,15; 3 – шнековий живильник; 4 – бункер для пилю; 5 – вакуум-насос ВН – 461; 6 – ротаметр; 7 – вентилі; 8 – фільтрувальні патрони з ковпачками; 9, 11 – місце відбору пилових проб; 10, 13 – шибери; 12 – прилад TESTOVENT

Основним обладнанням стенду є:

1. Пиловловлювач 1 (рис. 3.2), що досліджується – циклон [11].
2. Вентилятор ВРП – 118 – 43. 1–3. 15. 1 (рис. 3.2, поз. 2);
3. Подавач подрібненої деревини шнекового типу (рис. 3.2, поз. 3);

4.Вакуум-насос ВН–461 продуктивністю $8,3 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ для відкачування частини пилогазового потоку – відбору пилових проб (рис. 3.2, поз.5);

5.Ротаметри типу РМ для вимірювання витрат повітря, що відсмоктується через фільтри (рис. 3.2, поз. 6);

6.Аспіратор для відсмоктування повітря у місцях скупчення деревних відходів та пилу;

7.Прилад TESTOVENT4000/07.88–1 використовувався для замірів швидкості пилоповітряного потоку (рис. 3.2, поз.12; рис. 3.3, поз.1.);

8.Пилозабірні трубки для відбору запиленої суміші із повітропроводу;

9. Ртутний термометр з ціною поділок – $0,2^\circ\text{C}$;

10. Аспіраційний психрометр М-34 для вимірювання вологості повітря.

Для проведення замірів використовували прилад TESTOVENT (рис. 3.3, поз. 1), що призначений для вимірювання швидкості повітря, статичного та повного тисків у трубопроводі. Цей прилад призначений для вимірювань: швидкості потоку в межах $0,4\text{--}40\text{ м/с}$ з точністю $\pm 0,1\text{ м/с}$; температури від -120°C до 130°C з точністю $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Кожен з параметрів може бути визначений в будь-якій точці, його середнє значення в декількох точках, а також середнє значення за певний проміжок часу.

Прилад складається із наступних елементів:

1. Крильчастий мікроанемометр $\varnothing 16 \text{ мм}$ з телескопічною трубкою для вимірювань швидкості повітря у трубопроводі у діапазоні $0,6\text{--}40 \text{ м/с}$ з точністю $\pm 0,1 \text{ м/с}$ (рис. 3. 3, а, поз. 2);

2. Пневмометрична трубка Піто ($L=500 \text{ мм}$, $D=7 \text{ мм}$) для вимірювання статичного та повного тисків у трубопроводі (рис. 3.3, а, поз. 3).

3. Перетворювач тиску (рис. 3.3, а, поз. 4).

4. Блок обробки та виведення інформації (рис. 3.3, поз. 1).



Рис. 3.3 Обладнання для проведення аеродинамічних замірів [11]

- 1 – блок обробки та виведення інформації (прилад TESTO – 445);
 2 – крильчастий мікроанемометр; 3 – циліндрична пневмометрична трубка Піто; 4 – перетворювач тиску

Кожний з параметрів (швидкість, статичний тиск) визначався в контрольних точках повітропроводу. Прилад давав змогу визначити середнє значення параметрів в декількох точках та середнє значення величини параметра в одній точці за певний проміжок часу. Конструкція циклона передбачала можливість зміни висоти циліндричної частини та глибини занурення вихлопної труби для вивчення їх впливу на аеродинаміку процесу циклонування та експлуатаційні характеристики апарата. З тією ж метою було виготовлено три конічні частини різного розміру.

Для регулювання витрат повітря крізь циклон на всмоктувальній гілці вентилятора встановлено шибєр 15 (рис. 3.2). Повітропроводи стенду задовольняли вимогам герметичності.

3.3.Визначення продуктивності циклона

Вимірювання продуктивності мережі проводились за вимогами ГОСТ 12. 3. 018 - 79 [10, 13, 28, 29] за методикою Л.М.Дорундяк на ділянках з розміщенням мірних перерізів на відстані не менше шести гідравлічних діаметрів за місцем збурення потоку і не менше двох гідравлічних радіусів перед ним.

Швидкість потоку повітря фіксували за допомогою крильчастого мікроанемометра та приладу TESTOVENT. Кількість точок замірів залежно від діаметра трубопроводу (без

центральної) вибирали відповідно до роботи [13]. Для діаметра трубопроводу $D_{mp}=200 - 250$ мм необхідна кількість цих точок складала 8[13].

Відстань від кожної точки до стінки повітропроводу d_i визначалася за формулою

$$d_i = \frac{D_{mp}}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2i-1}{n_m}} \right), \quad (3.6)$$

де D_{mp} – діаметр трубопроводу, мм; i – порядковий номер точки; n_m – кількість точок заміру для даного діаметра.

При зміні швидкості і витрат повітря в трубопроводі характер розподілу швидкостей практично не змінюється, тому відношення середньої по перерізу трубопроводу швидкості повітря і швидкості в його центрі V_0 вважають сталою величиною, яку називають коефіцієнтом поля швидкості K_n :

$$K_n = \frac{V_{сep}}{V_0}. \quad (3.7)$$

При наступних дослідженнях проводяться тільки заміри швидкості всередині трубопроводу і використовуються формула:

$$V_{cp} = K_n \cdot V_0. \quad (3.8)$$

Виходячи з швидкості потоку, знаходяться продуктивність системи і приводяться до нормальних умов [29]:

$$V_H = V_{cp} \frac{T_o}{T} \frac{p_a}{p_o}, \quad (3.8 \text{ a})$$

де T_o, p_o – відповідно температура та атмосферний тиск в початковий момент;

T, p_a – відповідно температура та атмосферний тиск під час проведення експерименту.

Визначення продуктивності проводилося у такій послідовності.

1. Фіксували в приміщенні:
 - 1.1. Температуру за допомогою спиртового термометра з ціною поділки $0,2^{\circ}\text{C}$;
 - 1.2. Атмосферний тиск та відносну вологість за допомогою барометра та аспіраційного психрометра М - 34.
2. Фіксували положення клапана шибера 15 на всмоктувальній ділянці мережі.
3. Встановлювали крильчастий мікроанемометр у певній точці заміру і жорстко його закріплювали.
4. Вмикали електродвигун вентилятора.
5. Проводили програмування приладу TESTOVENT на визначення середнього значення швидкості за певний проміжок часу.

6. Вмикали прилад на початок замірів і витримували протягом 30 секунд, після чого зупиняли вимірювання і визначали середнє значення швидкості в точці.
7. Переміщали давач у наступну точку заміру і після витримки паузи, необхідної для стабілізації показів, повторювали п. 5, 6.
8. Після заміру швидкостей в усіх точках визначали середню швидкість і коефіцієнт поля швидкостей повітря (2.2).
9. Визначали витрати повітря на даній ділянці і приводили їх до нормальних умов.
10. При повторному замірі продуктивності в даному перерізі визначали швидкість в певній точці і значення середньої швидкості V_{cp} .
11. Повторювали дії пунктів п.9-10.

3.4 Визначення гідравлічного опору

Відповідно до рекомендацій методики [13], визначення гідравлічного опору пиловловлювача проводили на незапиленому повітрі у такій послідовності:

- 5 Проводились вимірювання: температури повітря за допомогою лабораторного ртутного термометра; відносної вологості повітря за допомогою аспіраційного психрометра; атмосферного тиску за допомогою метеорологічного барометра-анероїда.
- 6 Відповідно до описаної вище методики проводили вимірювання продуктивності у трубопроводі та приводили її значення до нормальних умов.
- 7 За допомогою пневмометричної трубки Піто - Прандтля і мікропроцесорного приладу TESTOVENT визначали значення повного тиску на прямолінійній ділянці трубопроводу перед циклоном та після нього. Довжина такої ділянки до пневмометричної трубки дорівнювала 20 діаметрів, а за трубкою 15 діаметрів повітропроводу.
- 8 Відповідно до [13] гідравлічний опір визначали як пропорційний різниці повного тиску перед і після циклону.

3.5 Статистична обробка результатів експерименту

Сукупність всіх можливих значень параметрів досліджуваного процесу утворює певну генеральну сукупність. При проведенні досліджень були доступні тільки окремі вибірки з цієї сукупності. Будь-яке значення шуканого параметра, що обчислене на основі обмеженої кількості дослідів, завжди містить елементи випадковості. Тому, з метою

встановлення коректності та достовірності результатів експериментальних досліджень всі матеріали були оброблені методами математичної статистики. За обчисленими характеристиками окремих дослідів оцінювали параметри досліджуваного процесу в цілому. До таких характеристик відносяться математичне сподівання вимірюваної величини, дисперсія і середнє квадратичне відхилення. Для їх обчислення використовували величини основних характеристик вибірок. При проведенні досліджень обчислювали такі числові характеристики [12].

1. :

- Середнє арифметичне спостережених значень

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (3.9)$$

де x_i – поточне значення / $i=1, 2, \dots, n$, n – кількість спостережень

- Зважене середнє \bar{x}_n :

$$\bar{x}_n = \frac{\sum_{i=1}^n x_i n_i}{\sum_{i=1}^n n_i}. \quad (3.10)$$

2. Характеристики розсіювання:

- Дисперсія S^2 :

$$S^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad (3.11)$$

- Середнє квадратичне відхилення S .

$$S = \sqrt{S^2};$$

- Середнє відхилення d :

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|. \quad (3.12)$$

Після визначення середнього відхилення й дисперсії найбільш відмінні від середнього значення результати вимірювань перевіряли на достовірність за критерієм Стьюдента, t_c .

Якщо обчислена величина t_c за формулою

$$t_c = \frac{|x_0 - \bar{x}|}{S} \quad (3.13)$$

більша від критичної, то такий результат x_0 вважають помилковим і відкидають як хибний. Імовірність попадання в критичну область $g\%$ називають рівнем значимості. В розрахунках приймали $g = 95\%$. Значення t при різних об'ємах вибірки n вказані в таблиці 3.1:

Таблиця 3.1 – Значення t_c – критерію Стьюдента

n	3	6	8	10	15	20	25	120
t	4,30	2,57	2,36	2,25	2,14	2,09	2,06	1,98

Після відкидання промахів обчислюють нові значення \bar{x} і S .

Середнє значення одного й того ж параметра із різних вибірок буде мати різну величину, тобто воно теж має свою дисперсію. Дисперсія середнього

$$\delta_x^2 = \frac{\delta^2}{n} \text{ або } S_x^2 = \frac{S^2}{n}. \quad (3.14)$$

Середнє квадратичне відхилення середнього арифметичного спостережених значень \bar{x} наближено, при великих n , вважають рівним $\frac{S}{\sqrt{n}}$, і результат серії вимірювання, як правило, записують у вигляді

$$x = \bar{x} \pm S/\sqrt{n}. \quad (3.15)$$

Крім цих оцінок часто застосовують ще й коефіцієнт варіації

$$\varsigma = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (3.16)$$

і показник точності середнього значення

$$\xi = \frac{S_{\bar{x}}}{\bar{x}} \cdot 100\% = \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot \frac{100\%}{\bar{x}} = \frac{\varsigma}{\sqrt{n}}. \quad (3.17)$$

Середнє арифметичне спостережених значень \bar{x} відрізняється від істинного значення x вимірюваного параметра на величину похибки $\pm \Delta$, а істинне значення з деякою імовірністю P знаходиться в межах

$$\bar{x} - \Delta \leq x \leq \bar{x} + \Delta. \quad (3.18)$$

Імовірність P знаходження дійсного значення, що дорівнює математичному сподіванню, в межах (3.18) називають довірчою імовірністю або рівнем достовірності, а ці границі – 100% довірчими інтервалами. Чим більші довірчі інтервали, тим вище ймовірність існування в них дійсного значення. Якщо похибку Δ виразити в долях $S_{\bar{x}}$, прийнявши $\Delta = tS_{\bar{x}}$, довірчі інтервали можна записати у вигляді

$$\bar{x} - tS_{\bar{x}} \leq x \leq \bar{x} + tS_{\bar{x}}, \quad (3.19)$$

де t_c – величина, що залежить від довірчої імовірності P :

Таблиця 3.2 – Значення t_c – критерію Стьюдента

P	0,997	0,990	0,980	0,954	0,950	0,900	0,800	0,700
t_c	3,00	2,58	2,33	2,00	1,96	1,67	1,25	1,04

Із таблиці 3.2 визначаємо, що з імовірністю $P=0,997$, тобто практично істинний результат лежить у довірчому інтервалі

$$\bar{x} - 3S_{\bar{x}} \leq x \leq \bar{x} + 3S_{\bar{x}}. \quad (3.20)$$

В цьому полягає суть правила „трьох сигм”.

Щоб середнє вимірюваної величини відрізнялось з довірчою імовірністю p від дійсного значення не більше, ніж на величину Δ , необхідно число вимірювань у кожному досліді брати не меншим n , де

$$n = \frac{t_c^2 S^2}{\Delta^2}. \quad (3.21)$$

Величину S^2 обчислюють за результатами попереднього випробування з великим числом вимірювань. Величину t_c вибирали з таблиці 3. 2. за заданою довірчою імовірністю P [12].

3.6 Висновки за Розділом 3

1. Описаний напрям та об'єкт дослідження, а також експериментальний стенд, за допомогою якого проводилися дослід по дослідженню аеродинамічних параметрів циклона.
2. Була визначена та описана продуктивність розробленого агрегату, його гідравлічний опір та була проведена статична обробка результатів експериментів, що підтверджували доцільність даної розробки.

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ЦИКЛОНА

4.1. Граничні та початкові умови для математичного моделювання повітря у циклоні

Для обґрунтування основних параметрів сепаратора важливе значення має аналіз руху повітря в циклоні. Процеси, які при цьому відбуваються, є надзвичайно складними і на сьогодні їх не вдалося повною мірою теоретично описати і дослідити. Залежно від фізико - механічних властивостей потоку та конструкційних особливостей пиловловлювача потік повітря може здійснювати або ламінарний, або турбулентний рух. При цьому біля стінок має місце явище приповерхневого шару.

Математичне моделювання аеродинамічного механізму роботи циклона проводиться за методикою Л.М.Дорундяк [11] для задачі про фільтрування деревного пилу у промислових циклонах. Припустимо, що потік повітря в циклоні є гомогенним середовищем, поведінку якого можна описати моделлю в'язкої стискуваної рідини (газу). Тоді повна система рівнянь для аналізу аеродинамічних процесів у циклоні містить: рівняння Нав'є-Стокса, рівняння нерозривності, рівняння стану і рівняння балансу тепла, які можна представити наступним чином.

Рівняння Нав'є-Стокса є основним рівнянням динаміки в'язкого газу і у векторному записі має такий вигляд

$$\rho \frac{d\vec{V}}{dt} = \rho \vec{F} - \text{grad}(p + \frac{2}{3} \mu \text{div} \vec{V}) + 2 \text{Div}(\mu \vec{S}). \quad (4.1)$$

У проекціях на осі декартової системи координат x, y, z дане рівняння можна представити таким чином.

$$\begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \text{div} \vec{V}) \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \text{div} \vec{V}) \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \text{div} \vec{V}) \end{aligned} \quad (4.2)$$

де $\vec{V}(u, v, w)$ – вектор швидкості точки суцільного середовища з координатами x, y, z в момент часу t (змінні Ейлера);

$u = u(x, y, z, t), v = v(x, y, z, t), w = w(x, y, z, t)$ – проекції вектора швидкості на осі нерухомої декартової системи координат;

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}; \\ \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}; \\ \frac{dw}{dt} &= \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}\end{aligned} \quad \text{– проекції вектора прискорення на осі нерухомої декартової системи координат;}$$

$\rho = \rho(x, y, z, t)$ – густина середовища в точці з координатами (x, y, z) в момент часу t ;

$\vec{F} = (F_x, F_y, F_z)$ – вектор масової сили;

$$\text{div} \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{– дивергенція вектора швидкості } \vec{V};$$

$$\text{grad} \varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad \text{– градієнт скалярного поля функції } \varphi;$$

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості.

$$\dot{S} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) & \frac{\partial w}{\partial z} \end{pmatrix} \quad \text{– тензор швидкості деформації;}$$

$\text{Div} T$ – дивергенція тензора T , яка визначається співвідношенням

$$\begin{aligned}(\text{Div} T)_x &= \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} \\ (\text{Div} T)_y &= \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} \\ (\text{Div} T)_z &= \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z}\end{aligned}$$

Рівняння нерозривності є математичним записом закону збереження маси певного об'єму суцільного середовища і у векторному представленні має вигляд

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.3)$$

або в декартовій прямокутній системі координат

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (4.3')$$

Рівняннями стану в механіці суцільного середовища називають рівняння, що зв'язують між собою тиск, температуру, густину та, можливо, інші фізичні характеристики середовища і входять у повну систему залежностей для опису руху деякого об'єму речовини. У випадку вивчення руху в'язкого газу припускають, що газ є досконалим, тобто тиск p , густина ρ і абсолютна температура T задовольняють закону Клапейрона

$$p = \rho R T, \quad (4.4)$$

де R – газова постійна, яка для різних газів приймає різні значення.

Якщо припустити, що коефіцієнт теплоємності при постійному тиску c_p є константою, то рівняння Клапейрона можна переписати в наступному вигляді

$$\frac{p}{\rho} = \frac{R}{c_p} h, \quad (4.4')$$

де h – ентальпія (теплова функція), яка задається співвідношенням

$$h = \int_0^T c_p(T) dT.$$

Припустимо також, що динамічний коефіцієнт в'язкості μ є функцією тільки абсолютної температури T . Найчастіше при цьому використовується степенева залежність

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^n, \quad (4.5)$$

де T_0 і μ_0 – відповідно абсолютна температура і коефіцієнт в'язкості, що відповідають деякому початковому стану газу

$$n = \begin{cases} 1, & T < 90K \\ 8/9, & 90 < T < 250K \\ 3/4, & 250 < T < 600K \\ 1, & T > 600K \end{cases}.$$

Згідно з гіпотезою Кармана [23] в середньому приймають $n=0,76$.

Невід'ємним атрибутом рівнянь руху в'язкого газу є рівняння балансу тепла, яке можна представити двома способами

$$\rho \frac{d}{dt} \left(h + \frac{V^2}{2} \right) = \rho \vec{P} \cdot \vec{V} + \frac{\partial p}{\partial t} + \operatorname{div}(2\mu \vec{\nabla} \dot{S} - \frac{2}{3} \mu \vec{V} \operatorname{div} \vec{V} + \frac{\mu}{\sigma} \operatorname{grad} h) \quad (4.6)$$

або

$$\rho \frac{dh}{dt} = \frac{dp}{dt} + 2\mu \dot{S}^2 - \frac{2}{3} \mu (\operatorname{div} \vec{V})^2 + \operatorname{div} \left(\mu \operatorname{grad} \frac{h}{\sigma} \right), \quad (4.6')$$

де $\sigma = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ – число Прандтля; λ – коефіцієнт теплопровідності газу.

Існує велика кількість конструкцій циклонів, проте в переважній своїй більшості корпуси цих пиловловлювачів є комбінацією циліндричних і конічних поверхонь, а тому з практичної точки зору для дослідження аеродинамічних процесів, що відбуваються всередині сепараторів доцільно використати не прямокутну декартову систему координат (x, y, z) , а циліндричну (r, θ, z) . Основні рівняння можна записати наступним чином.

Рівняння Нав'є-Стокса в циліндричній системі координат набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r} &= F_r - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left(\nabla^2 V_r - \frac{V_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_\theta}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{V_r V_\theta}{r} &= F_\theta - \frac{1}{\rho} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \nu \left(\nabla^2 V_\theta - \frac{V_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} \right); \\ \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \cdot \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} &= F_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \nabla^2 V_z \end{aligned} \quad (4.7)$$

де $\vec{V}(V_r, V_\theta, V_z)$ – вектор швидкості точки суцільного середовища з координатами r, θ, z в момент часу t ;

$V_r(r, \theta, z, t), V_\theta(r, \theta, z, t), V_z(r, \theta, z, t)$ – проекції вектора швидкості на осі нерухомої системи координат;

$\rho = \rho(r, \theta, z, t)$ – густина середовища в точці з координатами (r, θ, z) в момент часу t ;

$\vec{F} = (F_r, F_\theta, F_z)$ – вектор масової сили;

$\text{div} \vec{V} = \frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial V_z}{\partial z}$ – дивергенція вектора швидкості \vec{V} в циліндричній системі координат ;

$\text{grad} \varphi = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}, \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)$ – градієнт скалярного поля функції φ ;

$$\dot{S} = \begin{bmatrix} \frac{\partial V_r}{\partial r} & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_\theta}{r} \right) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{V_\theta}{r} \right) \right) & \frac{1}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r}{r} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial V_\theta}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} \right) & \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{bmatrix} - \text{тензор деформації.}$$

Дивергенція тензора T $\text{Div} T$ в циліндричній системі координат визначається співвідношеннями

$$\begin{aligned} (\text{Div} T)_r &= \frac{\partial T_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta r}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{zr}}{\partial z} + \frac{T_{rr} - T_{\theta\theta}}{r} \\ (\text{Div} T)_\theta &= \frac{\partial T_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{z\theta}}{\partial z} + \frac{T_{r\theta} - T_{\theta r}}{r} \\ (\text{Div} T)_z &= \frac{\partial T_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{T_{rz}}{r} \end{aligned}$$

Рівняння нерозривності у циліндричній системі координат має вигляд:

$$r \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_r r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho V_\theta)}{\partial \theta} + r \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0, \quad (4.8)$$

$$\frac{dV_r}{dt} = \dot{V}_r = \frac{\partial V_r}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_r}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_r}{\partial z} - \frac{V_\theta^2}{r};$$

– проекції вектора прискорення на осі нерухомої циліндричної системи координат;

$$\frac{dV_{\theta}}{dt} = \dot{V}_{\theta} = \frac{\partial V_{\theta}}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_{\theta}}{\partial r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\partial V_{\theta}}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_{\theta}}{\partial z} + \frac{V_r V_{\theta}}{r};$$

$$\frac{dV_z}{dt} = \dot{V}_z = \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_{\theta}}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z}$$

Таким чином, для визначення семи невідомих u, v, w, p, ρ, μ, T отримали систему семи рівнянь, які складають замкнуту систему рівнянь руху в'язкого газу. Зазначимо при цьому, що для в'язкого газу повинні також виконуватися такі припущення:

а) газ є „ньютонівським” середовищем, тобто має місце узагальнений закон Ньютона про лінійний зв'язок між тензором напружень \dot{P} і тензором швидкостей деформації \dot{S}

$$\dot{P} = 2\mu\dot{S} - \left(p + \frac{2}{3}\mu\text{div}\vec{V} \right) E,$$

б) коефіцієнти теплоємності c_p і c_v , а значить і їхнє відношення k , не залежить від абсолютної температури газу і є фізичними константами газу.

в) коефіцієнт теплопровідності газу λ пропорційний динамічному коефіцієнту в'язкості μ , так що число Прандтля $\sigma = \frac{\mu c_p}{\lambda}$ розглядається як фізична постійна газу, тобто $\sigma = \text{const.}$

Припустимо, що число Рейнольдса Re буде меншим за деяке критичне значення $Re_{кр}$ ($Re < Re_{кр}$), тобто розглядається ламінарний рух середовища.

Для отримання розв'язку в конкретній області при інтегруванні системи диференціальних рівнянь потрібно задати початкові і граничні умови. Як початкові умови визначають задання в початковий момент часу поля швидкостей, температури і тиску. У момент часу $t=0$ частинки повітря знаходяться у перерізі $z=0$ (рис. 3.1). Якщо позначити швидкість потоку повітря у вхідному патрубку циклона V , то значення складових швидкості потоку повітря для циклона з гвинтовим вхідним патрубком дорівнює:

$$V_{\theta} = V \cdot \cos \alpha; V_z = V \cdot \sin \alpha; V_r = 0,$$

де α – кут нахилу вхідного патрубка до горизонту (рис. 4. 1).

Швидкість потоку повітря у вхідному патрубку V , як правило знаходиться у межах $V=17-25$ м/с в залежності від конструкції циклона та технологічних параметрів процесу циклонування.

Температуру повітряного потоку у початковий момент часу вважаємо рівною температурі зовнішнього середовища $T=T_{зс}$, а значення тиску визначається аеродинамічною характеристикою вентилятора.

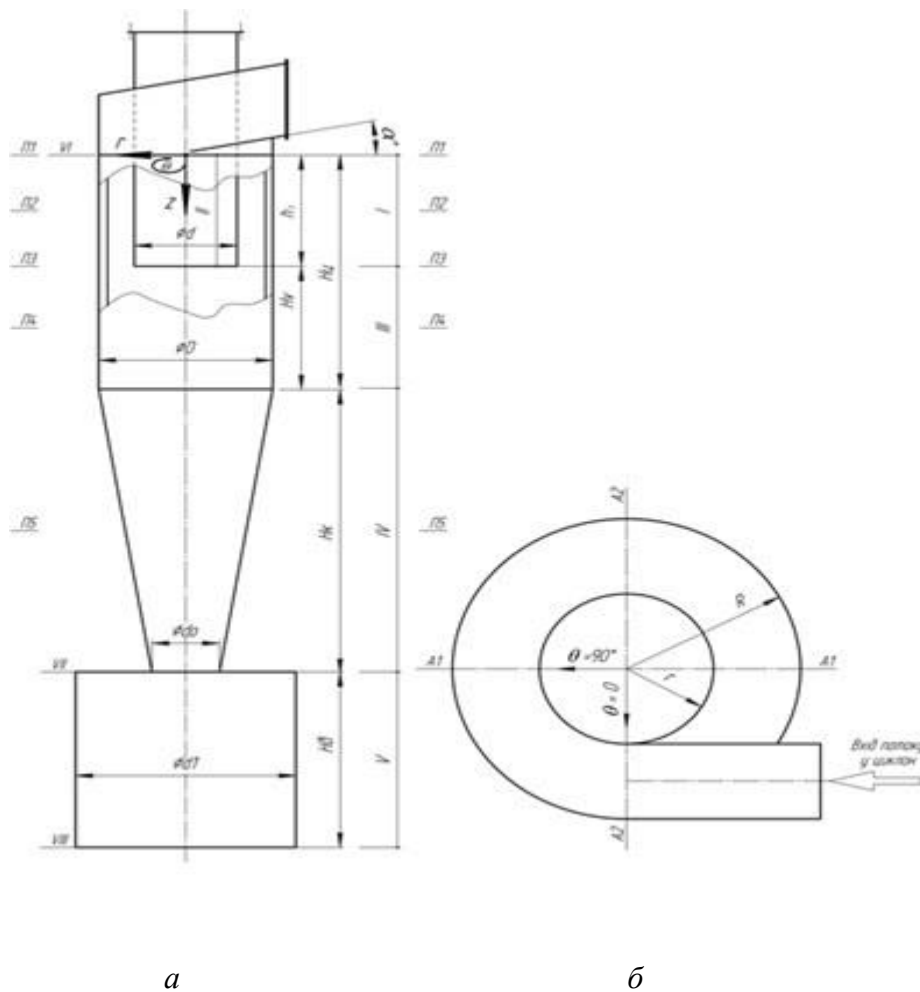


Рис. 4.1 Основні ділянки циклона щодо граничних умов:

а – поздовжні ділянки та горизонтальні площини циклона; *б* – площина П1

Граничні умови залежать від форми циклона та від особливостей його функціонування. Як приклад, розглянемо найпростіший вид граничних умов – умови прилипання і непроникності потоку повітря на поверхнях і знехтуємо теплообміном між стінками апарата і довкіллям. Вважатимемо також, що статичний тиск на виході з вихлопної труби циклона дорівнює атмосферному (атмосферний тиск при нормальних умовах $p_a = 101325$ Па). За методикою Л.М.Дорундяк[11]

Поверхню циклона можна умовно поділити на п'ять вертикальних (I-V) і 3 горизонтальні (VI-VIII) ділянки (рис. 4. 1).

Ділянка I – простір між вихлопною трубою та циліндричною частиною апарата. Вона обмежена двома циліндричними поверхнями: $r=d/2+0$ та $r=D/2$ де d – діаметр вихлопної труби, D – діаметр циліндричної частини циклона. Величина z може набувати значення з діапазону $(0;h_3)$.

$$\text{Тут } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Ділянка II – простір всередині вихлопної труби: $r=d/2-0, 0 \leq z \leq h_3$.

$$V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Ділянка III – простір, який розміщений між нижнім краєм вихлопної труби та початком конічної частини. Її границя $r = D/2; h_3 \leq z \leq H_{II}$,

$$\text{а граничні умови мають вигляд } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

Ділянка IV – конічна частина апарата. Тут значення r зменшується від $r=D/2$ (при $z=H_{II}$) до $r=d_0/2$ (при $z=H_{II}+H_K$). Тому значення r слід розглядати як функцію від z , а саме,

$$r = \frac{D-d_0}{2H_K} z + \frac{D(H_K + H_{II}) - d_0 H_{II}}{2H_K}, \quad H_{II} \leq z \leq (H_K + H_{II}),$$

$$\text{а граничні умови набувають вигляду } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial n} = 0.$$

Ділянка V – бункер. Тут $r = d_1/2; H_{II} + H_K \leq z \leq H_{II} + H_K + H_{\theta}$.

$$\text{Граничні умови: } V_{\theta}=0; V_z=0; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0.$$

На горизонтальній площині VI (рис. 4. 1): $d/2 < r < D/2; z = 0$;

$$V_{\theta}=V(r) \cos \alpha; V_z=V(r) \sin \alpha; V_r=0; \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

При $0 < r < d/2$; і $z=0$ повітряний потік поводитьсь відповідно до закону твердого тіла [29], тобто $V_{\theta} = \omega r$. На основі досліджень, які представлені у роботах [35] будемо вважати V_z сталим у перерізі вихлопної труби, а значення радіальної складової – рівним

нулю. Тоді: $V_z = 4Vab/\pi d^2$, де a , b – відповідно довжина і ширина вхідного патрубку циклона і $V_r = 0$. $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$.

На горизонтальній площині VII (рис. 4. 1):

$$\frac{d_0}{2} < r < \frac{d_1}{2}; \quad z = H_\kappa + H_u; \quad V_\theta = 0; \quad V_z = 0; \quad V_r = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

На горизонтальній площині VIII (рис. 4.1):

$$0 < r < \frac{d_1}{2}; \quad z = H_u + H_\kappa + H_\sigma; \quad V_\theta = 0; \quad V_z = 0; \quad V_r = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0.$$

Таким чином, записані співвідношення представляють собою повну систему залежностей для дослідження руху повітря в циклоні.

4.2 Результати дослідження гідравлічного опору циклона

Для побудови аеродинамічної характеристики сепаратора знаходили значення повного тиску на вході в апарат та на виході з нього при різних значеннях швидкості V потоку у вхідному патрубку. Гідравлічний опір Δp циклона визначали як різницю повних тисків у вхідному патрубку та на виході з вихлопної труби. Фіксували значення Δp при $V = 5 - 28$ м/с. Результати представлені на рисунку 4.2.

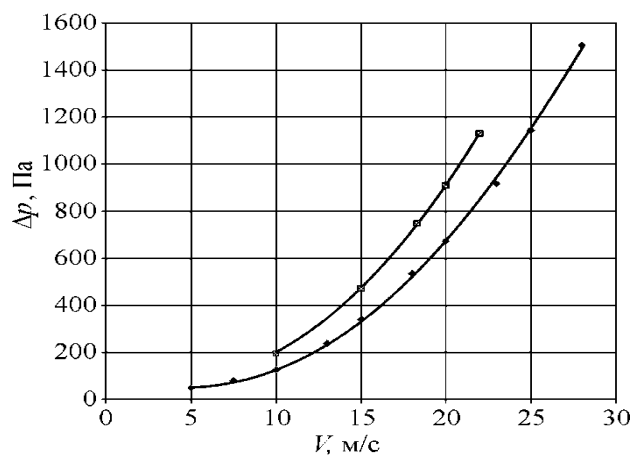


Рис. 4.2 Залежність гідравлічного опору циклона від швидкості потоку повітря у вхідному патрубку

1 – математичне моделювання;

2 – експеримент

Між швидкістю повітря у вхідному патрубку циклона і гідравлічним опором апарату існує нелінійна залежність, що й підтверджується результатами моделювання. Якщо порівняти отримані значення з експериментальними даними, які представлені у роботі [25], то, наприклад, для швидкості повітря 18 м/с, відповідно до експериментальних даних гідравлічні втрати тиску становлять 764 Па. За результатами математичного моделювання отримано значення 534 Па. Відхилення можуть бути пояснені явищами турбулентності у реальному потоці, що не враховується у запропонованій математичній моделі. Характер кривих 1 та 2 є однаковий, тобто запропонована модель в цілому вірно відображає процес циклонування. Перевага запропонованої моделі у порівнянні з іншими моделями, які описані в роботах [3, 6, 17, 27], полягає у тому, що вона враховує форму сепаратора.

4.3. Вплив форми елементів конструкції циклона на його гідравлічний опір

У рамках досліджень розглядалася модель циклона, яка зображена на рисунку 4.1 і досліджувався вплив таких параметрів, як висота циліндричної частини (H_u), глибина занурення вихлопної труби (h_z), висота конічної частини (H_k), діаметр вихлопної труби (d), діаметр пиловипускного патрубка (d_o) та гідравлічний опір циклона. Значення H_u

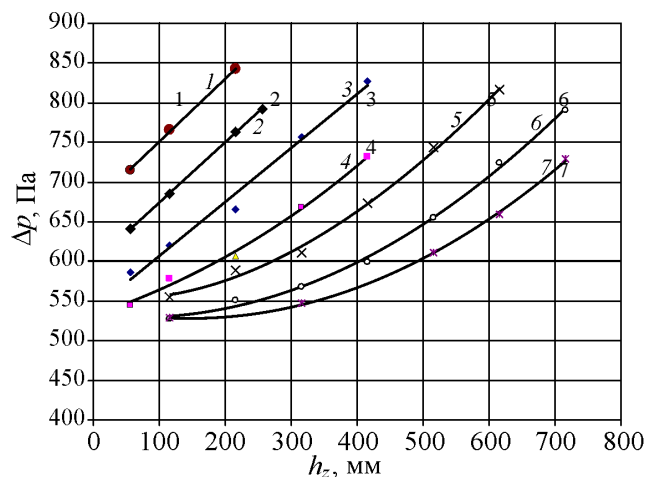


Рис 4. 3 – Залежність гідравлічного опору циклона від глибини занурення вихлопної труби при різних висотах циліндричної частини [11]

($\rho_n=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0=20^\circ\text{C}$, $V=18 \text{ м/с}$)
 1 – 200 мм; 2 – 250 мм; 3 – 300 мм;
 4 – 350 мм; 5 – 400 мм; 6 – 450 мм;
 7 – 500 мм

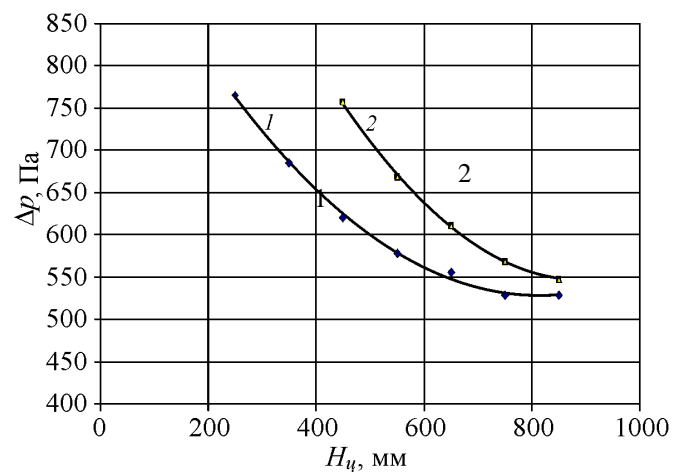


Рис 4. 4 – Залежність гідравлічного опору циклона від висоти циліндричної частини при різних значеннях глибини занурення вихлопної труби ($\rho_n=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0=20^\circ\text{C}$, $V=18 \text{ м/с}$) 1 – 116 мм; 2 – 316 мм [11]

змінювали у діапазоні від 200 мм до 850 мм, значення h_z вибирали з діапазону 56 – 716 мм.

На рисунку 4.3 зображено залежність гідравлічного опору циклона від глибини занурення вихлопної труби. При збільшенні h_z гідравлічний опір апарата зростає. Характер залежності Δp від h_z може бути як лінійним так і нелінійним, та визначається висотою циліндричної частини. Для H_u , які є меншими від 350 мм (рис. 4.3, криві 1 – 3), залежність є лінійною. При зростанні висоти циліндричної частини (рис. 4.3, криві 3 – 7) він стає нелінійним.

На рисунку 4.4 відображено вплив висоти циліндричної частини циклона на його гідравлічний опір при різних значеннях глибини занурення вихлопної труби.

Збільшення H_u призводить до зменшення гідравлічного опору циклона. Такий висновок на перший погляд виглядає нелогічним, оскільки збільшення H_u приводить до збільшення аеродинамічного шляху, який проходить потік у циклоні, а значить гідравлічний опір апарата мав би зростати. Результати моделювання свідчать про зворотне. Причини зниження гідравлічного опору циклона можна пояснити зміною напрямку потоку повітря та наявністю вторинних потоків у циклоні. Перехід зовнішнього вихору в циклоні у внутрішній відбувається не тільки у конічній частині циклона, але й у циліндричній. Цей процес пов'язаний з перемішуванням потоків, а значить, у значній мірі визначає гідравлічний опір циклона та його ефективність. Зменшення простору, у якому проходить такий поворот приводить до зростання гідравлічного опору апарата. Можна вважати, що при значенні H_u , рівному 700 мм, подальше зростання висоти циліндричної частини не приводить до зниження гідравлічного опору циклона.

На рис. 4.5 зображено залежність гідравлічного опору циклона від відстані H_v від нижнього краю вихлопної труби до конічної частини апарата. Обчислення проводилися для різноманітних значень H_u та h_z . Так при $H_u=375$ мм, $h_z=225$ мм значення $H_v=150$ мм (рис. 4.5, точка 1) гідравлічний опір циклона складає 729 Па. При збільшенні висоти циліндричної частини вдвічі $H_u=775$ мм (рис. 4.5, точка 2) та $h_z=600$ мм ($H_v=150$ мм) гідравлічний опір апарата зростає тільки на 4,5% і становить 764 Па.

В результаті проведеного аналізу приходимо до висновку про визначальний вплив відстані від нижнього краю вихлопної труби до конічної частини циклона на гідравлічний опір апарата. Отримані результати дають змогу підтвердити гіпотезу про те, що основну частину гідравлічного опору циклона складають втрати в його середині на енергетичне розсіювання в обертовому потоці, подолання турбулентних завихрень, і тільки незначна

частина втрат пов'язана з розширенням потоку на вході, розсіюванням на виході і тертям до стінок циклона [25 , 26].

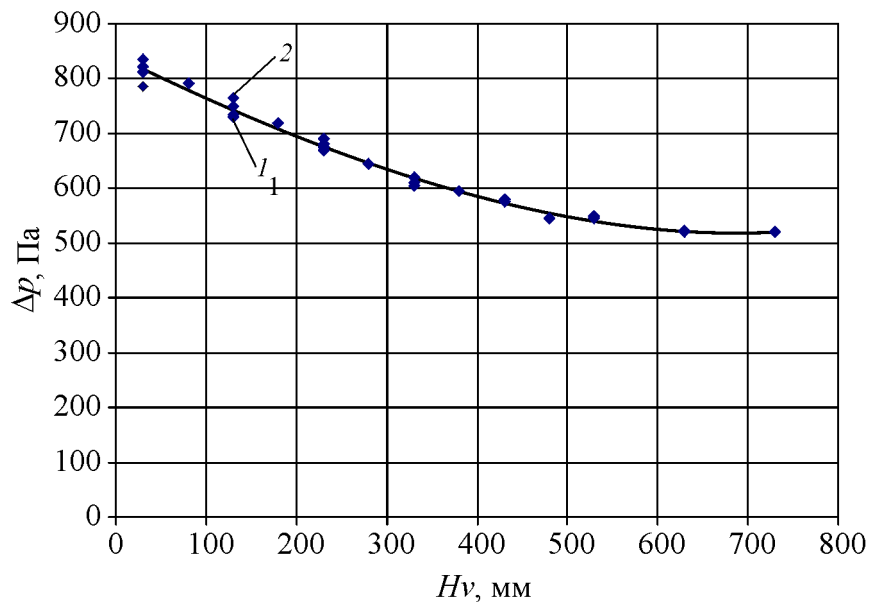


Рис. 4.5 – Залежність гідравлічного опору циклона від відстані H_v

Аналогічним чином збільшення простору для здійснення повороту повітряного потоку можна здійснити шляхом збільшення висоти конічної частини H_K або збільшенням діаметру d_0 пиловипускного отвору. На рисунку 4.6 зображено залежність гідравлічного опору від діаметра пиловипускного отвору.

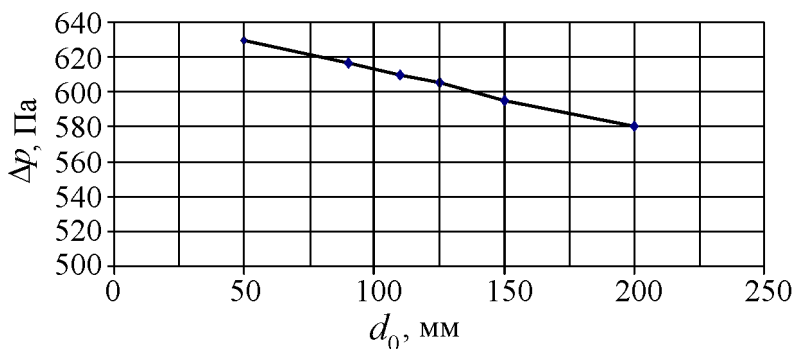


Рисунок 4.6 – Залежність гідравлічного опору циклона від діаметра пиловипускного отвору

Зі збільшенням значення d_0 гідравлічний опір знижується. Проте зниження Δp не є значним. Зі зростанням d_0 від 50 мм до 200 мм Δp знижується тільки на 5% (від 630 Па до 598 Па). На рисунку 3.7 зображено графічну залежність гідравлічного опору циклона від висоти його конічної частини. Якщо порівняти графічні залежності, представлені на рисунках 4.4 та 4.7, то можемо зробити висновок, що зміна висоти циліндричної частини

(рис. 3.4) має більший вплив на гідравлічний опір циклона ніж зміна висоти конічної частини апарата (рис. 3.7). Так при збільшенні $H_{\text{ц}}$ на 20 % у порівнянні з рекомендованим значенням (650 мм) гідравлічний опір в циклоні знизиться на 13% в той час, коли зростання H_K на 20% знизить Δp на 3,6%. З практики [10] відомо, що збільшення висоти конічної частини призводить до підвищення ефективності процесу очищення повітря в циклоні. З іншої сторони збільшення значення H_K та $H_{\text{ц}}$ підвищує металоємність конструкції апарата і збільшує його габаритні розміри.

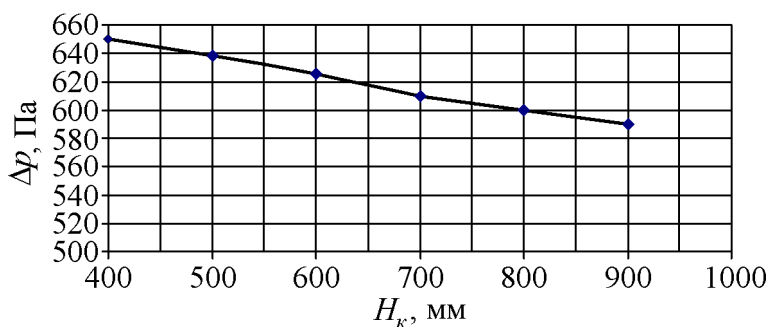


Рис. 4.7 Залежність гідравлічного опору від висоти конічної частини

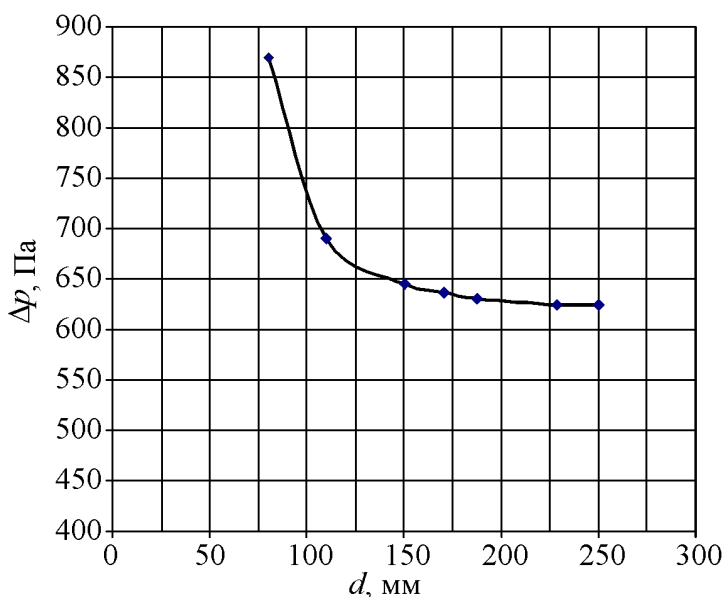


Рис 4.8 – Залежність гідравлічного опору від діаметру вихлопної труби

Значний вплив на гідравлічний опір циклона має діаметр його вихлопної труби. При зменшенні значення d гідравлічний опір циклона зростає (рис. 4.8). При збільшенні діаметра від 90 до 150 мм спостерігаємо різке зниження гідравлічного опору циклона. При діаметрах вихлопної труби 200-260 мм гідравлічний опір циклона практично не знижується. З експериментальних досліджень [10, 18] відомо,

що надмірне збільшення d може призводити до того, що на осі вихлопної труби будуть виникати потоки, направлені до середини апарата, що значно знижує ефективність процесу очищення запиленого повітря у циклоні.

4.4 Аналіз руху повітря у циклоні

Запропоновані рівняння (3.1) – (3.7) дають змогу не тільки дослідити вплив окремих елементів конструкції циклона на гідравлічний опір апарата, а й визначити швидкість потоку всередині пиловловлювача. На аеродинаміку процесу сепарації важливий вплив мають не тільки швидкості в точці, але і її тангенціальна та осьова складові.

Внутрішній простір циклона умовно розділили п'ятьма горизонтальними площинами П1 – П5 (рис. 3.1) та двома вертикальними А1 – А2. Будували графічні залежності розподілу швидкості потоку, її тангенціальної та осрової складової на лінії перетину горизонтальної та вертикальної площини. На осі абсцис відкладали відстань L між крайніми стінками циклона. При цьому значення $L=0$ відповідало стінці, яка знаходиться ліворуч, а $L=0,4$ м – праворуч. Вісь циклона відповідає значенню $L = 0,2$ м. Отримані результати представлені на рисунках 4.9 – 4.13.

На рисунку 4. 9 зображено графічні залежності швидкості потоку та її складових на лінії перетину площин П1 та А2. В просторі між стінками циклона та вихлопною трубою з боку вхідного патрубку ($L > 3,1$ м) значення швидкості становить 16–17 м/с. Різниця швидкостей є незначною (становить близько 1 м/с) через те, що потік ще не почав інтенсивно обертатися навколо осі апарата. Тут ще проходить перехід від прямолінійного потоку у вхідному патрубку до обертового у циліндричній частині циклона. Після повороту площини на 180° у сепараційній зоні ($L < 0,9$ м) градієнт швидкості є високим (близько 7,5 м/с), що пояснюється теж переходом. Подібний характер зміни має й тангенціальна складова швидкості повітря. Поблизу вхідного патрубку різниця значень складає близько 1 м/с в той час, коли при $L < 0,9$ м вона становить близько 10 м/с. Характер розподілу осрової швидкості повітря теж має значні відхилення від симетричності. Такий самий характер розподілу спостерігається й вздовж прямої перетину площин П1 та А1 (рис. 4.10).

По мірі подальшого обертання та опускання потоку вниз, до площини П2, яка розміщена на вертикальній позиції $z = h/2$, різниця швидкостей, у просторі між стінкою та вихлопною трубою, знижується. На рисунку 4. 11 зображено графічні залежності швидкості потоку та її складових вздовж лінії перетину площин П2 та А2. Характерним для цієї ділянки є й те, що зменшується перепад значень даних величин в сепараційній зоні по різні боки вихлопної труби ($L < 0,9$ м та $L > 3,1$ м).

При значеннях $0,9 \text{ м} < L < 3,1 \text{ м}$ тангенціальна складова швидкості має лінійний характер через прийняте припущення, що на цій ділянці потік поводить себе, як тверде тіло (рис. 4.10 – 4.13).

У просторі, який розміщений нижче вихлопної труби, графічні залежності швидкості та її складових можна вважати симетричними (рис. 4.12). Це свідчить про те, що потік стає усталеним. В просторі зовнішнього вихору, який направлений вниз ($L < 0,9 \text{ м}$ та $L > 3,1 \text{ м}$) тангенціальна складова швидкості повітряного потоку змінюється за законом [20, 30, 32] :

$$V_{\tau} \times R^n = \text{const},$$

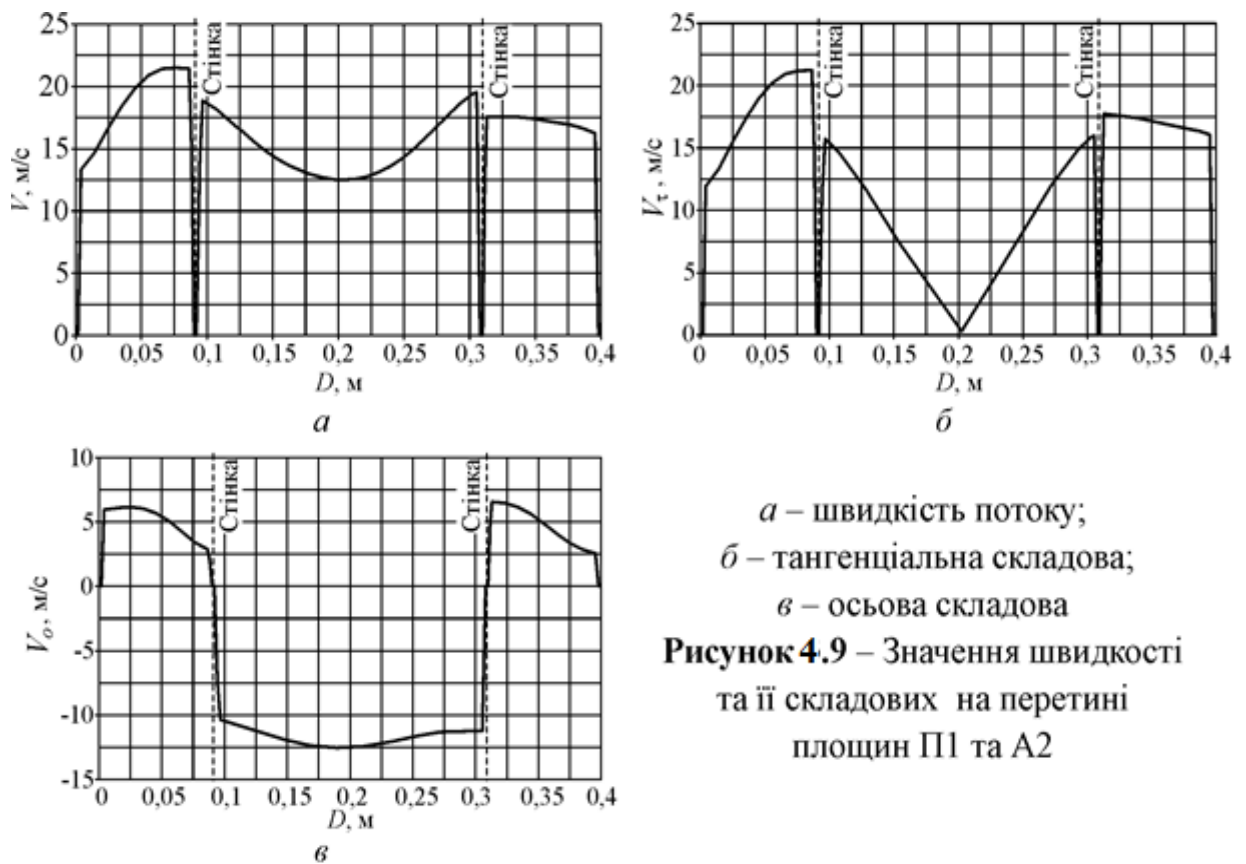
де V_{τ} – тангенціальна складова швидкості повітря;

R – відстань від осі циклона до точки заміру швидкості;

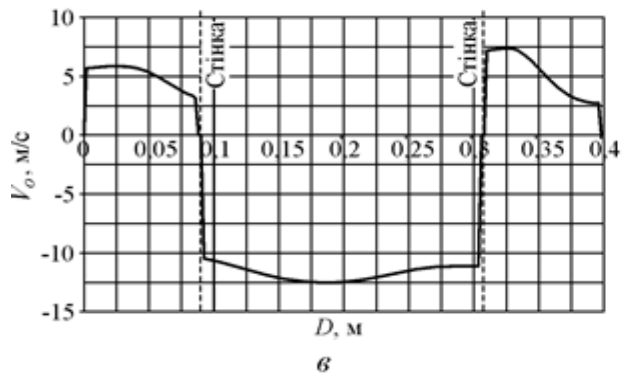
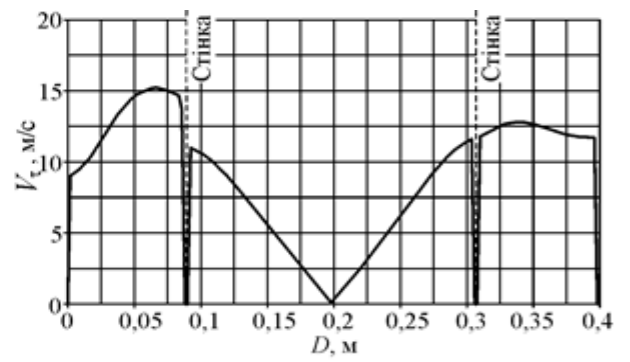
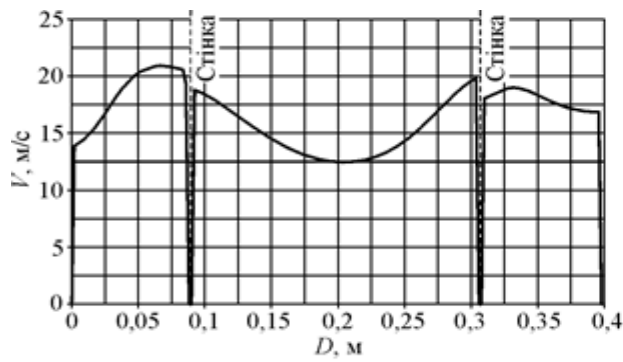
n – показник степеня, який є характерним для кожної конструкції циклона та режиму очищення повітря.

4.5 Дослідження статичного тиску

Зміна напрямку повітряного потоку супроводжується виникненням градієнту статичного тиску ($\Delta p_{ст}$). Найнижче значення статичного тиску у циклоні спостерігається на осі обертання потоку. В напрямі до зовнішніх стінок величина $\Delta p_{ст}$ зростає. Градієнт статичного тиску має значний вплив на ефективність процесу повітроочищення. При значному перепаді статичного тиску утворюються доволі сильні вторинні потоки, які направлені від зовнішньої стінки до осі циклона. Найдрібніші частинки пилу ($< 5 \text{ мкм}$), внаслідок незначної дії відцентрової сили, яка на них діє, захоплюються такими потоками і крізь вихлопну трубу виводяться у атмосферу. На вловлення крупних частинок пилу $\Delta p_{ст}$ теж має значний вплив, оскільки на частинку пилу, яка знаходиться у змінному полі статичного тиску діє сила, протилежна відцентровій. Різкий перепад статичного тиску приводить до турбулізації потоку, що у свою чергу приводить до підвищення гідравлічного опору циклона та зниження його ефективності. Тому при розробленні нових та модернізації існуючих циклонів слід брати до уваги характер розподілу статичного тиску всередині корпусу апаратів. На рисунку 4.17 а–г зображено розподіл статичних тисків повітря вздовж лінії перетину горизонтальних та вертикальних площин.

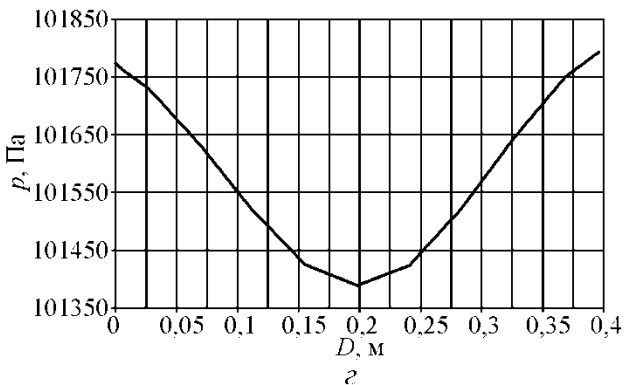
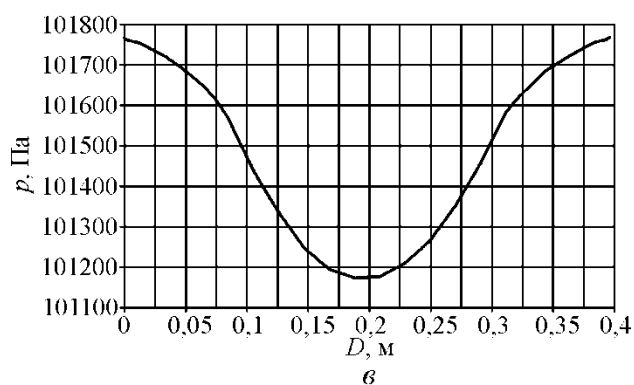
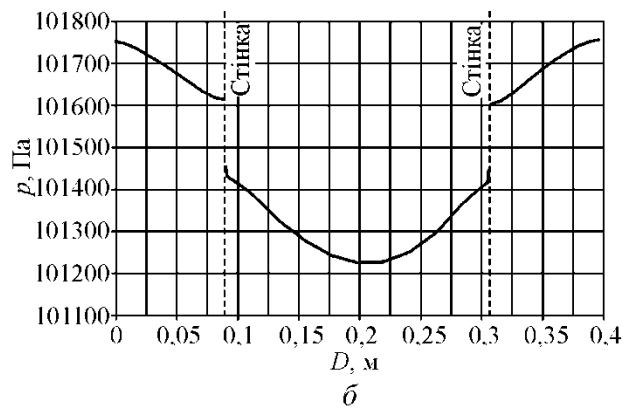
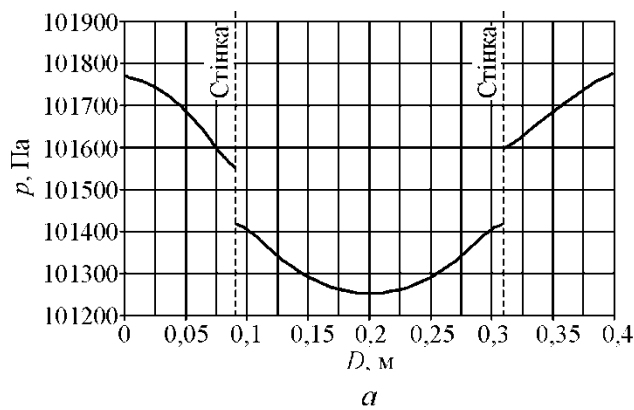


Перепад статичного тиску у просторі між вихлопною трубою і зовнішньою стінкою циклона вздовж лінії перетину площин П1 і А1 (рис. 4.17, а) змінюється від 101780 Па на периферії до 101550 Па поблизу вихлопної труби і складає 230 Па. Всередині вихлопної труби $p_{ст}$ складає 101410 Па поблизу стінки вихлопної труби та 101250 Па – на осі пиловловлювача. Загальний перепад статичного тиску поблизу зовнішньої стінки апарата та на осі циклона складає 530 Па. По мірі опускання потоку вниз до площини П2 (рис. 4. 17, б) перепад статичного тиску в сепараційній зоні зменшується до 145 Па, при цьому він змінюється від 101755 Па до 101610 Па. Відповідно у вихлопній трубі $p_{ст}$ знаходиться у межах 101430 – 101220 Па. Загальний перепад статичного тиску – 535 Па. У просторі, який розміщений нижче вихлопної труби зміна тиску між його значенням поблизу вихлопної труби (101760 Па) та на осі апарата (101180 Па) становить 580 Па (рис. 4.17, в). Відповідний перепад статичного тиску у площині П4 (рис. 4.17, г) становить 560 Па. Максимального значення $\Delta p_{ст}$ набуває поблизу нижнього краю вихлопної труби. Саме у цьому просторі й спостерігаються найбільш потужні вторинні потоки, які приводять до інтенсивного перемішування внутрішнього та зовнішнього вихорів, що призводить до значного підвищення гідравлічного опору циклона та зниження його ефективності.



a – швидкість потоку;
б – тангенціальна складова;
в – осьова складова

Рисунок 4.10 – Значення швидкості та її складових на перетині площин П1 та А1

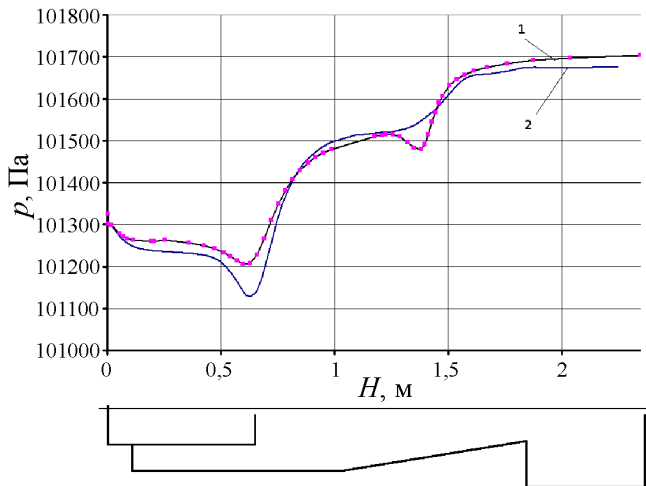


a – перетин площин П1 і А1; *б* – перетин площин П2 і А1;

в – перетин площин П3 і А1; *г* – перетин площин П4 і А1

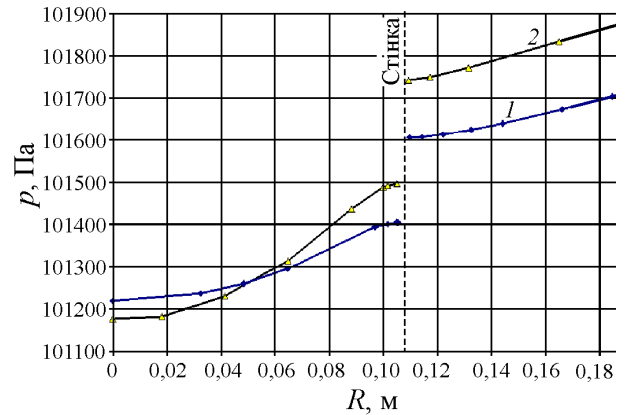
Рисунок 4.11 – Розподіл статичного тиску в циклоні вздовж ліній перетину площин

У рамках досліджень проводився аналіз впливу окремих елементів циклона на розподіл статичного тиску у сепараторі. Вивчався вплив форми конічної частини на розподіл статичного тиску на осі циклона. При виборі тієї чи іншої конструкції конічної частини, слід брати до уваги й умови розвантаження подрібненої деревини у бункер. На рисунку 4.12 зображено розподіл статичного тиску $p_{ст}$ по висоті циклона у випадку застосування традиційного (крива 1) та зворотного (крива 2) конусів.



1 – зворотній конус;

2 – традиційний конус



1 – зворотній конус;

2 – традиційний конус

Рисунок 4.12– Розподіл статичного тиску по осі циклона в апараті зі зворотним та традиційним конусом

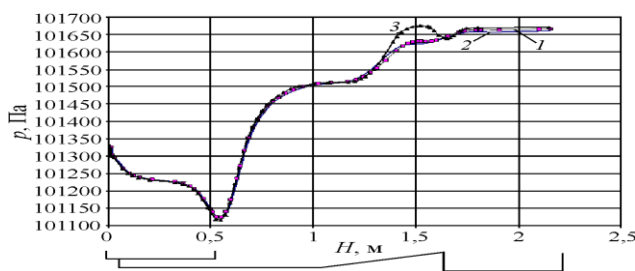
Рисунок 4.13 – Розподіл статичного тиску на проміжку від осі до зовнішньої стінки циклона на рівні середини вихлопної труби в апараті зі зворотним та традиційним конусом

У сепараційній зоні менший перепад статичного тиску (рис. 4.13) спостерігається в циклоні зі зворотним конусом, що мало б створювати більш сприятливі умови для очищення повітря. Ще одним аргументом на користь використання зворотного конуса є висока концентрація пилу у вхідному потоці. В циклонах з традиційним конусом можливим є забивання пиловипускного отвору, в той час як конструкції зі зворотним конусом такої небезпеки позбавлені.

На рисунках 4.14 – 4.16 представлені залежності статичного тиску на осі циклона від верхнього краю вихлопної труби до дна бункера для різних значень діаметру

пиловипускного отвору, висоти циліндричної частини, діаметра вихлопної труби та глибини її занурення.

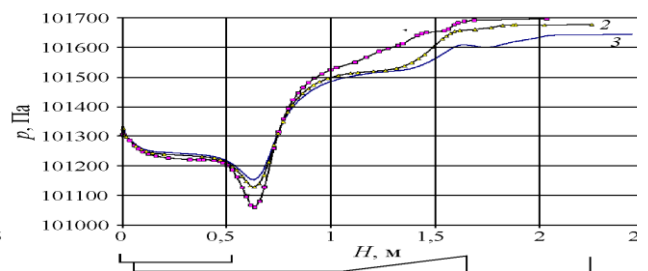
З аналізу нових конструкцій повітроочищувального обладнання [18 , 30] відомо, що критичним фактором в роботі циклона є тиск у бункері апарата. Якщо у пилозбірнику виникає розрідження, то виникає явище всмоктування повітря з атмосфери у бункер, що значно знижує ефективність очищування пилоповітряної суміші. З інших робіт [19] відомо, що відсмоктування частини повітря з бункера сприяє підвищенню ефективності процесу очищування та одночасно знижує гідравлічний опір апарата. На думку автора, влаштовувати складні механізми для такого відбору повітря з бункера є недоцільно, оскільки це приведе до ускладнення конструкції циклона. Відомими є приклади роботи циклонів на підприємствах без бункера. Це пояснюється тим фактом, що традиційно такі апарати встановлюють на нагнітальній стороні вентилятора, тобто вони працюють під напором, а тому легко добитися підвищення статичного тиску в місці з'єднання конуса з бункером та у самому пилозбірнику. Тому доцільно провести вивчення аеродинаміки пиловловлювача при наявності витікання частини повітря з бункера. При цьому слід особливу увагу приділити тому, щоб у пилозбірнику не виникало розрідження. Беручи до уваги отримані результати про те, що найбільший вплив на характер зміни статичного тиску в нижній частині циклона має діаметр вихлопної труби приходимо до висновку про доцільність влаштування шибера у вихлопній трубі. Це дасть змогу регулювати частку загальної продуктивності циклона, що буде виходити в атмосферу крізь фільтрувальний рукав на кришці бункера.



1–150 мм; 2–110 мм; 3–150 мм

Рисунок 4.14 – Розподіл статичного тиску по осі циклона при різних діаметрах пиловипускного отвору

($\rho_{\text{п}}=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $V=18 \text{ м/с}$)



1–300 мм; 2–600 мм; 3–800 мм

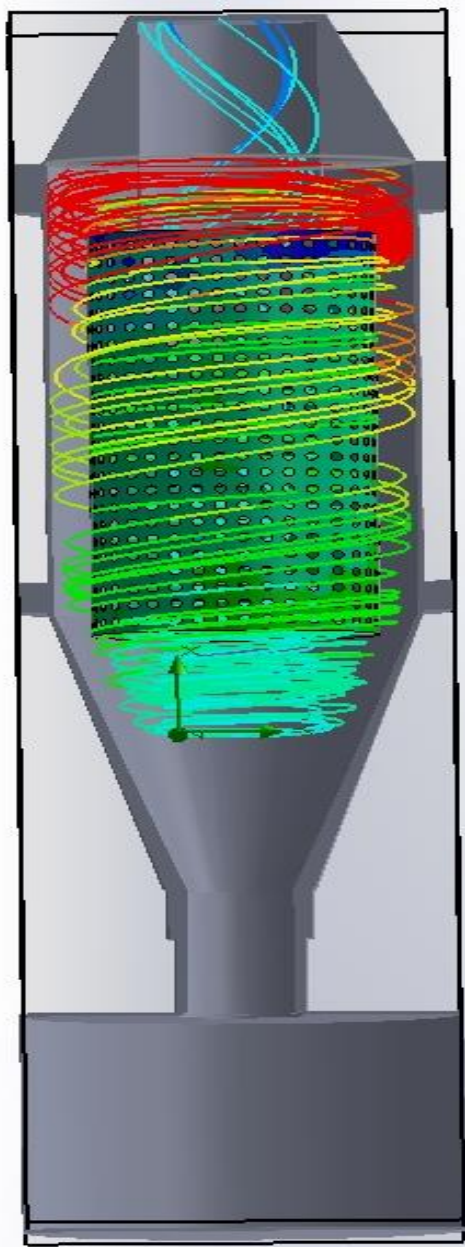
Рисунок 4.15 – Розподіл статичного тиску по осі циклона при різних значеннях висоти циліндричної частини

($\rho_{\text{п}}=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $V=18 \text{ м/с}$)

4.6 Результати дослідження гідравлічного опору циклона при комп'ютерному моделюванні

Гідравлічний опір пиловловлювача визначали, як різницю повних тисків на вході та виході з сепаратора. Вимірювання повних тисків проводили відповідно до методики, яка описана у розділі 2, на стенді, зображеному на рисунку 3.2. Вивчався вплив швидкості

повітря у вхідному патрубку апарата, вплив форми та розмірів окремих елементів конструкції на гідравлічний опір циклона.



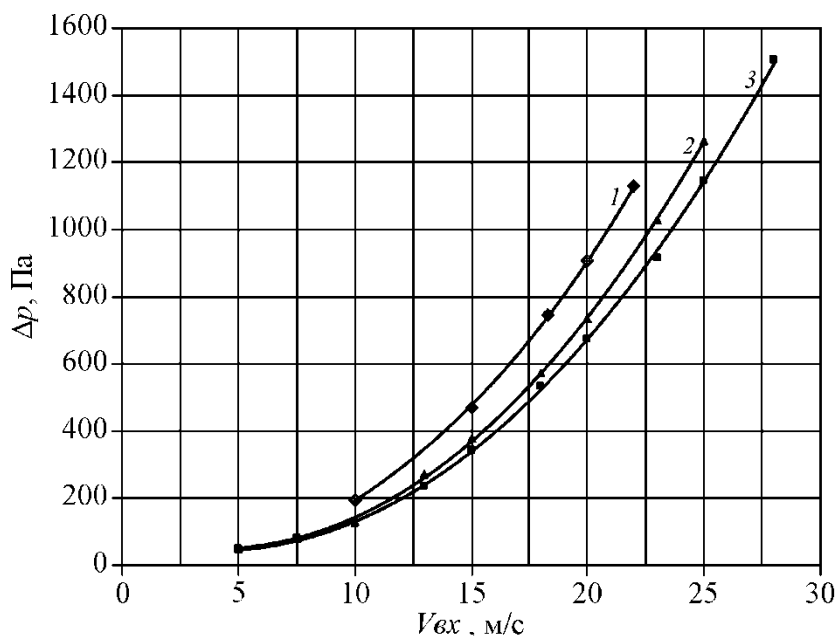
На рисунку 4.17 (крива 1) зображено залежність гідравлічного опору пиловловлювача від швидкості потоку у вхідному патрубку. Характер залежності є нелінійним. З проведеного експерименту отримали значення гідравлічного опору пиловловлювача: при швидкості потоку у вхідному патрубку $V_{ex}=18$ м/с гідравлічний опір апарата Δp становить 728 Па. При зростанні V_{ex} до 20 м/с Δp зростає до 908 Па. Після перевищення швидкості у вхідному патрубку $V_{ex}>23$ м/с різко зростають енергетичні витрати на очищення. На тому ж графіку (криві 2, 3) зображено залежності Δp від V_{ex} , які були отримані з числової реалізації розробленої математичної моделі (крива 3) та за допомогою програмного пакету FlowVision (крива 2). Результати усіх досліджень правильно відображають процес циклонування, характер залежності і є

Рис. 4.16 Схема руху часток при комп'ютерному моделюванні

доволі близькими.

Вивчали вплив форми окремих елементів конструкції апарата(висоти його циліндричної частини, глибини занурення вихлопної труби, висоти конічної частини,

висоти бункера) на Δp . На рисунку 4.18 зображено результати експериментального дослідження залежності гідравлічного опору циклона від висоти його циліндричної частини. Крива 1 відображає результати експериментальних досліджень, крива 2 – отримана засобами математичного моделювання.



1 – експеримент;
2 – математичне
моделювання

Рисунок 4.17 – Залежності гідравлічного опору циклона від швидкості у вхідному патрубку.

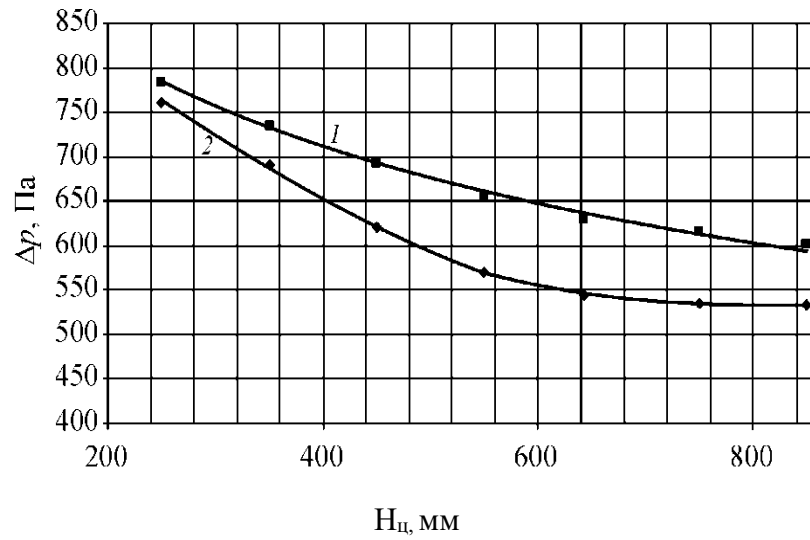
$\rho_{п}=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$,
 $V=18 \text{ м/с}$

Отримано підтвердження висновку, який був зроблений раніше, про те, що зі збільшенням висоти циліндричної частини циклона знижується його гідравлічний опір. При значенні $H_{ц}=220$ мм гідравлічний опір апарата пропорційний втраті тиску 790 Па за результатами експериментальних досліджень (крива 1) та 765 Па за результатами математичного моделювання (крива 2). При висоті циліндричної 640 мм значення Δp відповідно становить 640 Па (крива 1) та 548 Па (крива 2). При зростанні значення $H_{ц}>640$ мм гідравлічний опір циклона знижується дуже повільно і при $H_{ц}=845$ мм $\Delta p=610$ Па. Відповідно до результатів математичного моделювання при $H_{ц}>640$ мм значення гідравлічного опору не змінюється.

Розбіжність значень пояснюється тими процесами, які проходять у реальному апараті (турбулізація потоку, відрив приповерхневого шару поблизу зовнішньої стінки, вихорами у потоці [31] і не враховуються при моделюванні).

Значний вплив на експлуатаційні характеристики циклона має глибина занурення вихлопної труби. Графічні залежності зображено на рисунку 4.19. Крива 1 відображає результати експериментів, крива 2 – математичного моделювання. Зі збільшенням

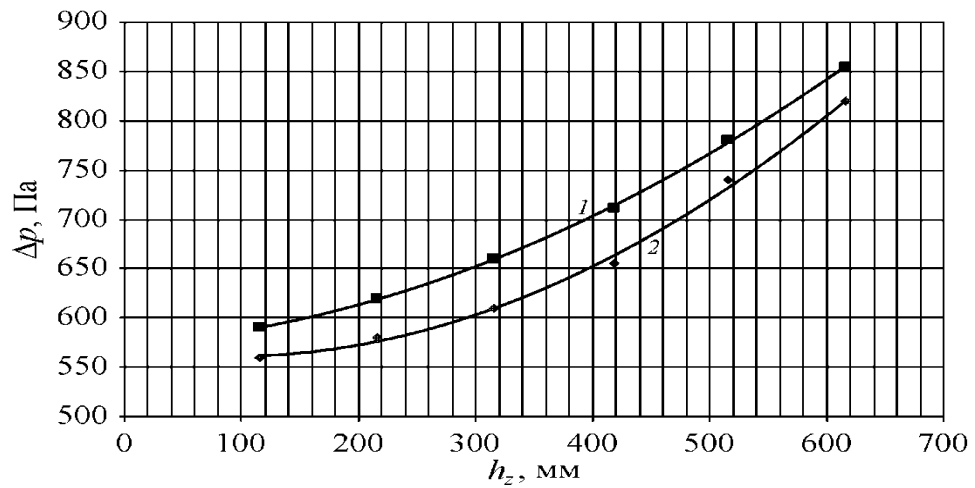
глибини (h_z) занурення вихлопної труби нелінійно підвищується значення гідравлічного опору циклона.



1 – експеримент; 2 – математичне моделювання

Рисунок 4.18 – Залежність гідравлічного опору циклона від висоти циліндричної частини

($\rho_{\text{п}}=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $V=18 \text{ м/с}$)

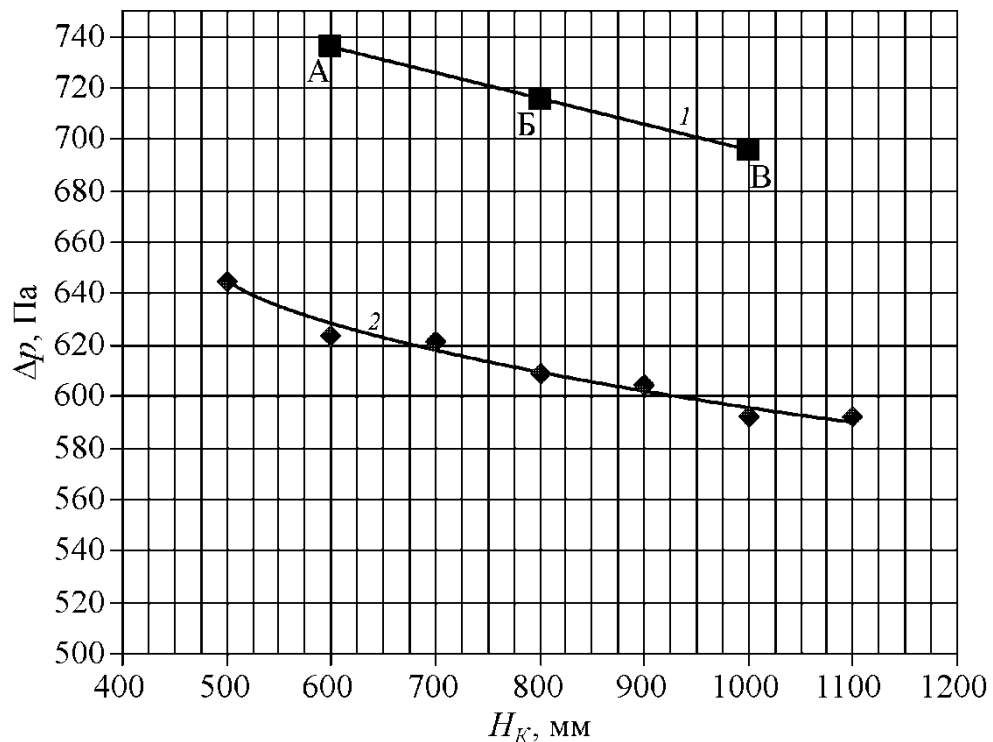


1 – експеримент; 2 – математичне моделювання

Рисунок 4.19 – Залежність гідравлічного опору циклона від глибини занурення вихлопної труби

($\rho_{\text{п}}=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $V=18 \text{ м/с}$)

Вплив конічної частини циклона на його гідравлічний опір є меншим у порівнянні з впливом висоти циліндричної частини. Для проведення досліджень було виготовлено три різних конічних частини циклона. Результати вимірювання значення Δp для кожної з частин зображено на рисунку 4.20 (точки А, Б, В). На тому ж рисунку зображено графік залежності (крива 1), який був отриманий внаслідок застосування запропонованої математичної моделі. Характер залежностей є подібним. При висотах конічної частини $H_k=600, 800, 1000$ мм гідравлічний опір циклона, який отримали експериментальним шляхом відповідно складав 736, 716, 696 Па. Відповідні значення, які отримані з числового аналізу математичної моделі складають 624, 609 та 592 Па.



1 – експеримент; 2 – математичне моделювання

Рисунок 4. 20 – Залежність гідравлічного опору циклона від висоти конічної частини

$$(\rho_n=1,3 \text{ кг/м}^3, T_0 = 20^\circ\text{C}, V=18 \text{ м/с})$$

Проводили дослідження впливу висоти бункера на гідравлічний опір циклона. Для цього конструкція бункера була виготовлена телескопічною. Отримані результати відображено на рисунку 4.21. Якщо при проектуванні пиловловлювача дотримуватися рекомендацій розробника, то незначні відхилення від його розмірів не впливають на гідравлічний опір апарата. Вплив може бути тільки у тому випадку, коли висоту бункера

надмірно зменшити. Результати досліджень показали, що при значенні H_b рівному 150 мм гідравлічний опір циклона складає 753 Па. При зростанні H_b до 600 мм значення Δp знижується до 720 Па. При подальшому збільшенні значення висоти бункера гідравлічний опір циклона залишається постійним.

При влаштуванні на бункері циклона фільтрувального рукава частина потоку буде потрапляти у атмосферу. При цьому процес очищення запиленого потоку можна описати таким чином. Запилений потік потрапляє у циклон через вхідний патрубок.

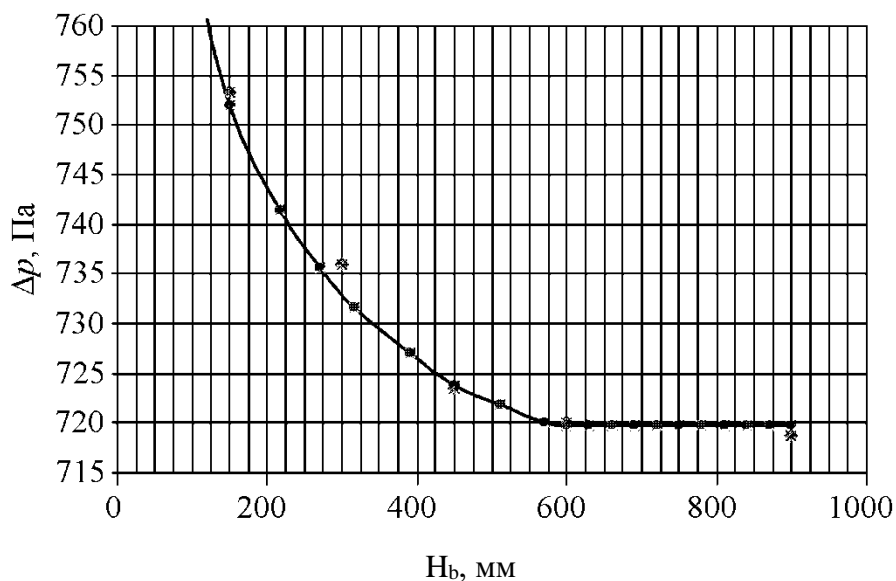


Рисунок 4.21 –Залежність гідравлічного опору циклона від висоти бункера

$$(\rho_{\text{п}}=1,3 \text{ кг/м}^3, T_0 = 20^\circ\text{C}, V=18 \text{ м/с})$$

Потрапивши у корпус циклона, повітря починає обертатися навколо осі апарата і одночасно здійснювати опускання до основи. У конічній частині циклона потік здійснює поворот на 180° і, продовжуючи обертатися, переходить у внутрішній вихор, який підіймається, і через вихлопну трубу потрапляє у атмосферу. Слід відмітити, що у бункер потрапляють здебільшого периферійні шари зовнішнього вихору, концентрація частинок пилу в яких є значною. Частка продуктивності, яка виходить через фільтрувальний рукав, як було встановлено раніше, залежить від конструкційних особливостей циклона, особливо від діаметра його вихлопної труби, глибини її занурення в апарат та висоти циліндричної частини пиловловлювача. Частка продуктивності, що виходить в атмосферу крізь бункер, що було показано вище, має вплив на характер розподілу складових швидкості потоку повітря у бункері, на ефективність процесу очищення повітря та на

гидравлічний опір апарата. Залежність гідрравлічного опору циклона від значення k відображено на рисунку 4.22.

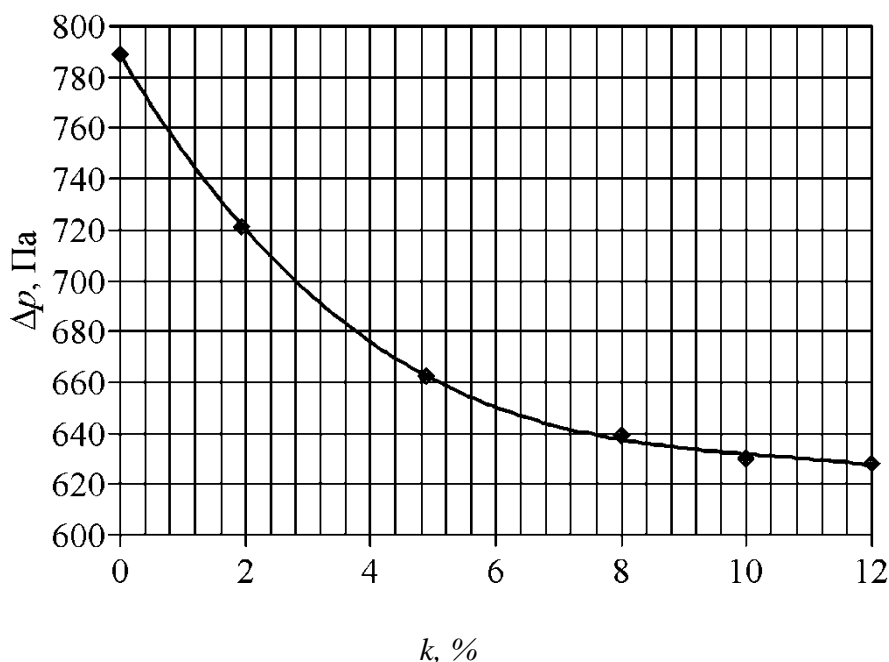


Рисунок 4. 22 –
Залежність
гідрравлічного
опору циклона від
частини повітря,
що виходить з
бункера
($\rho_{\text{п}}=1,3 \text{ кг/м}^3$, $T_0 =$
 20°C , $V=18 \text{ м/с}$)

При зростанні значення k в діапазоні від 0 до 10% гідрравлічний опір пиловловлювача знижується у межах від 789 Па до 631 Па. Дослідження проводили при швидкості повітря на вході у циклон рівній 18 м/с. Таким чином вже невеликі значення k ($>2\%$) приводять до значного (у межах 8,6%) зниження гідрравлічного опору циклона. Причини такого зниження можуть бути пояснені зниженням швидкості у вихлопній трубі, зменшенні градієнту статичного тиску всередині апарата та зниженні ступеня турбулізації потоку. Після перевищення значення k більше 12% значення гідрравлічного опору стабілізується, причому його значення (близько 630 Па) є на 20,4% нижчим, аніж при герметичному бункері.

4.7 Висновки за розділом 4

1. В даному розділі були розглянуті питання математичного моделювання фільтру типу циклон , а саме його гідравлічний опір, вплив зміни елементів конструкції на гідравлічний опір агрегату , був проведений аналіз руху повітря в середині циклонного фільтру , та проведено дослідження статичного тиску.

Розділ 5. РОЗРОБКА СТАРТАП – ПРОЕКТУ

Метою даного розділу є проведення маркетингового аналізу стартап – проекту для того, щоб визначити принципові можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

5.1. Опис ідеї проекту

У табл.5.1 надано інформацію про зміст ідеї, можливі напрямки застосування, основні вигоди, що може отримати користувач товару.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап - проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка та впровадження у масове виробництва фільтра типу циклон на базі циклону ЦН-15 , котрий має більший ступінь очистки повітря за рахунок наявності фільтруючої сітки у циліндричній поверхні фільтра , при цьому даний агрегат не змінює своїх габаритних розмірів.	1. Машинобудування	Змога створення агрегатів котрі будуть мати меншу ступінь негативного впливу на навколишнє середовище
	2. Системи вентиляції	Зменшення небезпечних викидів підприємств у навколишнє середовище.

У таблиці 5.2 зроблено аналіз техніко – економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів.

Таблиця 5.2- Визначення характеристик ідеї проекту

	Техніко-економічні характеристик и ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	ЦН-15	ЦН-11	СИОТ-М1			
1	Степінь очистки, %	98%	98%	95%	98%		+	
2	Вартість, тис.грн	14	22	82	14.5			+
3	Тиск (МПа)	6	6	6	6		+	

Аналіз слабких, нейтральних та сильних сторін техніко – економічних характеристик ідеї дозволяє зробити висновок, що дана ідея може бути конкурентоспроможною.

5.2. Технологічний аудит ідеї проекту

Оскільки ідея проекту полягає в новому технологічному способі очистки промислового повітря: .

- даний агрегат виготовлено з металу можливо виконати деякі деталі з композитного сплаву , але наразі таких не має на ринку , виготовляти на замовлення не рентабельно.

5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап проекту

В даному пункті необхідно визначити ринкові можливості, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкові загрози, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів .

5.3.1. Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 6.3).

Таблиця 5.3. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	10
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	70 млн. дол.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Відсутні
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	ГОСТ 33007-2014 Газоочисне та пиловловлювальні пристрої. Методи визначення запиленості газових потоків . Загальні технічні вимоги та методи контролю.
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	8%

За таблиці 5.3 видно, що за попереднім оцінюванням є ринок привабливим для входження.

5.3.2. Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 5.4).

Таблиця 5.4. - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Зменшення шкідливих викидів у навколишнє середовище	1) Аеро промисловість; 2) Станко - будівництва;	1) Різний тип обладнання; 2) Різні потужності виробництва	1) Ремонто-придатність; 2) Окупність в найкоротші строки; 3) Надійність 4) Висока продуктивність

5.3.3. Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. 5.5 - 5.6). Фактори в таблицях подані в порядку зменшення значущості.

Таблиця 5.5.-Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Вартість	Можливе забивання фільтруючої сітки	Відмова від становлення
2	Строк служби	Строк служби має бути більшим ніж строк окупності системи	Заміна на нову систему іншого постачальника. Відмова від подальшої співпраці.

Таблиця 5.6. - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Підвищення рівня очистки повітря	Зменшення викидів в атмосферу	Перехід на систему даного типу для всіх етапів виробництва, де необхідна очистка повітря
2	Зменшення витрат на систему	Зменшення собівартості продукту, що випускається	Зниження вартості вихідного продукту

5.3.4. Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (табл. 5.7).

Таблиця 5.7.- Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/чиста	монополістична	У разі монополістичної конкуренції легко заснувати нову фірму або залишити ринок. Нові продавці часто відчують труднощі з новими для покупців торговельними марками і послугами.
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/...	Національна	Національна конкуренція сприяє вливанню капіталів і товарів державою та інвесторами, створює конкурентну боротьбу
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	внутрішньогалузева	Сприяла зниженню витрат виробництва, впровадженню НТП, підвищенню ефективності виробництва.
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	товарно-родова	Конкуренція між різними видами товарів, які можуть виконувати подібні функції.
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	нецінова	Головною конкурентною перевагою є висока степінь очистки повітря.
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	марочна	ситуація на ринку, де компанія розглядає як своїх конкурентів компанії, що пропонують подібний продукт тим же цільовим покупцям

5.3.5. Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 5.8).

Таблиця 5.8. - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На ринку спостерігається тенденція до збільшення кількості підприємств і посилення конкуренції на ринку.	Бар'єри входу на ринок є порівняно незначними. Вартість організації бізнесу сягає 40 тис. дол.	Існує чітка залежність від постачальників як якості продукції, так і можливих обсягів її виробництва.	Споживачі мають широку географію	Посилилася конкуренція зі сторони товарів-субститутів – інших типів очищення повітря

Висновки: має місце інтенсивна конкурентна боротьба з боку прямих конкурентів, є можливість виходу на ринок, товари-замінники пропонують меншу степінь очистки або більші габарити.

5.3.6. На основі аналізу конкуренції, проведеного в п. 5.3.5 (табл. 5.8), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 5.2), вимог споживачів до товару (табл. 5.4) та факторів маркетингового середовища (табл. 5.5-5.6) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 5.9.

Таблиця 5.9.- Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Унікальність системи очистки повітря	В умовах монополістичної конкуренції, коли фактор диференціації ТМ є ключовим засобом ведення конкурентної боротьби, важливим є створення та підтримання способу очистки повітря, що створює певний захист від конкурентних зіткнень.
2	Ціна	Оскільки такий спосіб очищення повітря є не дуже дорогим, то ціна на товар є одним з засобів ведення конкурентної боротьби. Тому чим вигіднішою є ціна для споживача, тим вірогідніше його вибір.

3	Маркетинговий бюджет	Від розміру маркетингового бюджету залежить здатність здійснювати маркетингову стратегію підприємства. Маркетингові заходи мають забезпечувати інші конкурентні переваги такі, як рівень диференціації, лояльності, репутація виробника, дистрибуція та просування.
---	----------------------	---

5.3.7. Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 5.10).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

Таблиця 5.10. - SWOT-аналіз стартап-проекту

<p>Сильні сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Унікальна система очистки повітря; 2. Підвищення рівня очистки повітря та зменшення шкідливих викидів 3. Нижча ціна порівняно з конкурентами 	<p>Слабкі сторони:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Слабке самозабезпечення фінансовими ресурсами; 2. Відсутність чітко вираженої маркетингової стратегії, непослідовність в її реалізації.
<p>Можливості:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Можливість збільшення обсягів реалізації системи 2. Можливість збільшення обсягів продаж за рахунок впровадження у продаж систем з більшою степеню очистки 	<p>Загрози:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Загроза втрати споживачів внаслідок підвищення тиску зі сторони товарів-субститутів 2. Загроза підвищення цін на продукт унаслідок підвищення цін на сировину та її дефіциту

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

5.4.1 Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 5.11).

Таблиця 5.11. - Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Аеро промисловість	+	високий	середня	середня
2	Станко – будівництва	+	високий	середня	середня
Які цільові групи обрано: обрані всі три цільові групи потенційних споживачів					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) визначена стратегія охоплення ринку: компанія працює із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги), значить використовується диференційований маркетинг.

5.4.2. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 5.12).

Таблиця 5.12. - Визначення базової стратегії розвитку

№	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Розвиток ринку	Масовий маркетинг	Низькі витрати створюють бар'єр входу для нових конкурентів і одночасно хороший захист проти товарів-замінників	Стратегія лідерства по витратах
2	Розвиток товару	Диференційований маркетинг	Відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарів-замінників	Стратегія диференціації
3	Більш глибоке проникнення на ринок	Концентрований маркетинг	Задоволення потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти	Стратегія спеціалізації

На основі таблиці 5.12 обрана базова стратегія розвитку - стратегія диференціації.

5.4.3. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 5.13).

Таблиця 5.13. - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента?	Стратегія конкурентної поведінки
1	Так	Так	Ні	Стратегія лідера
2	Ні	Так	Ні	Стратегія виклику лідера
3	Ні	Ні	Так	Стратегія наслідування лідеру
4	Так	Ні	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі таблиці 5.13 стратегія конкурентної поведінки - стратегія лідера.

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

5.5.1. Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 5.14 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 5.14. - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Підвищення степені очистки повітря	Підвищення якості роботи	Легкість в обслуговуванні та діагностиці
2	Зменшення витрат на систему	Зниження собівартості готової продукції	Невелика вартість системи

5.5.3. Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або

товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 5.15). Аналіз проводиться експертним методом.

Таблиця 5.15.- Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
0.5-0.8 тис. дол.	1.2-8.2 тис. дол.	2 млрд. дол.	12-15 тис. дол. на ступінь

5.5.4. Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 5.16):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 5.16. - Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Характерно для наукомістких галузей зі специфічним і (або) дорогим товаром, який може бути придбаний обмеженим числом споживачів, які потребують специфічних компонентів для свого специфічного фінального продукту (машинобудування з виробництвом за індивідуальними замовленнями або дрібними серіями).	Просування на ринок подібних продуктів в рамках даної системи збуту не вимагає будь-якої широкої реклами. Швидше потрібно одного разу з'ясувати, хто з потенційних покупців інновацій може в них потребу і яка поточна платоспроможність даного клієнта.	Канал нульового рівня	Канал складається з виробника, який продає свій товар безпосередньо споживачам (через відділ збуту, збутові філії, мережу фірмових магазинів, поштово-торгівлю тощо)

5.5.5. Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 5.17).

Таблиця 5.17. - Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Наукомісткі галузі зі специфічним і (або) дорогим товаром, який може бути придбаний обмеженим числом споживачів	Включають в себе пряму поштову розсилку, замовлення по друкованим каталогам і продаж в режимі он-лайн.	Конкурентне позиціонування, яке базується на демонстрації переваг товарів підприємства над товарами конкурентів.	Отримати можливість у кілька разів збільшити обсяг продажу своїх товарів	Головними елементами структури реклами є тема реклами і девіз рекламної кампанії.

5.6 Висновки

Було проведено аналіз можливості ринкової комерціалізації проекту. За результатами аналізу було виявлено, що технологічна реалізація проекту можлива, визначені його сильні та слабкі сторони, конкурентні позиції на ринку.

Даний ринок є привабливим для входження через невелику вартість та високу ефективність технології. З огляду на потенційні групи клієнтів, не дуже великі бар'єри входу на ринок, через унікальність технології, у порівнянні з товарами конкурентів, даний проект можна вважати перспективним для впровадження.

Розділ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Право на безпечні та нешкідливі умови праці визнані в Україні одним з конституційних прав людини і громадянина. Забезпечення цього права здійснюється за допомогою системи правових соціально-економічних організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних лікувально-профілактичних заходів та засобів. У своїй сукупності нормативні акти про охорону праці - це правила стандарти, норми, положення. Інструкції, і інші документи, яким надано чинність правових норм обов'язкових для виконання. У науковій літературі охорони праці як правову категорію розглядають у широкому і вузькому сенсі.

Покращання умов праці підвищується за рахунок суворого дотримання вимог охорони праці підчас проведення технічних робіт, що дає змогу підвищити рівень використання робочого часу, в наслідок чого ми можемо спостерігати підвищення якості продукції, покращання використання основних виробничих фондів, зменшення кількості аварій.

У даній роботі досліджується система для очищення промислового повітря за допомогою фільтра типу циклон. Розрахункова та теоретична частина роботи проводиться за комп'ютером. Основна частина роботи проводиться в лабораторії на експериментальному стенді. Для безпечної та правильної роботи необхідно дотримуватись норм охорони праці.

Аналіз шкідливих і небезпечних факторів при роботі

Основними шкідливими та небезпечними чинниками при роботі за експериментальним стендом є:

- Мікроклімат
- Освітлення
- Шум
- Електрична безпека
- Пожежна безпека приміщення

Дана робота виконувалась переважно в лабораторії першого корпусу НТУУ "КПІ ім. Ігоря Сікорського". Було проаналізовано можливі шкідливі та небезпечні фактори при роботі в лабораторії та визначені параметри які відповідають чи не відповідають нормам охорони праці. Зроблені висновки по підвищенню безпеки при роботі в даному приміщенні.

6.1 Мікроклімат

Порушення параметрів мікроклімату на робочих місцях сприяє створенню шкідливих і небезпечних мікрокліматичних умов, які при спільній дії на людину викликають значні зміни теплового стану, що може призвести до порушення стану здоров'я працівників навчального закладу. В таблиці приведені оптимальні та допустимі норми показників мікроклімату значення згідно з ДСН 3.3.6.042-99 та їх фактичні значення.

Таблиця 6.1

Допустимі, фактичні та оптимальні показники мікроклімату на робочих місцях
виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт за рівнем енерговитрат, Вт		Допустимі		Фактичні	Оптимальні
			діапазон нижче оптимальних величин	діапазон вище оптимальних величин		
Холодний	Іб (141-175)	Температура повітря, °С	18-26	24,1 - 25,0	20 - 21	22 - 24
		Температура поверхонь, °С	19,0- 26,0		20 - 23	21 - 25
		Відносна вологість повітря, %	75		50	60 - 40
		Швидкість руху повітря, м/с	не більше 0,1		0,1	0,1
Теплий	Іб (141-175)	Температура повітря, °С	21,0 - 22,9	25,1 - 28,0	22 - 23	23 - 25
		Температура поверхонь, °С	25,1 - 28,0		22 - 25	22 - 26
		Відносна вологість повітря, %	15 - 75		50	60 - 40
		Швидкість руху повітря, м/с	0,1	0,2	0,1	0,1

В даному приміщенні протягом року підтримується температура повітря 20-23°C, що є нормою для комфортної роботи. Дане приміщення обладнане системою вентиляції, що підтримує необхідний повітрообмін і вологість повітря приблизно 50%. Двічі на день проводиться вологе прибирання приміщення (до та після роботи).

6.2 Освітлення

Для роботи експериментальним стендом необхідно забезпечити добре освітлення приміщення. В даній аудиторії використовується як природне так і штучне освітлення. А оскільки освітлення виробничих та допоміжних приміщень повинно відповідати діючим санітарним вимогам до природного і штучного освітлення, нормам проектування.[..]

Проведемо розрахунок штучного освітлення:

Для визначення кількості світильників визначимо світловий потік, падаючий на поверхню по формулі:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{n}$$

де F – світловий потік, що розраховується, Лм; E – нормована мінімальна освітленість, Лк (визначимо по таблиці).

Роботу можна віднести до розгляду точних робіт, отже, мінімальна освітленість буде $E=300$ Лк при газорозрядних лампах:

S – площа освітлювального приміщення (у нашому випадку $S=30\text{м}^2$);

Z – відношення середньої освітленості до номінальної (зазвичай приймається рівним 1.1-1.2, нехай $Z=1.2$); K – коефіцієнт запасу, що враховує зменшення світлового потоку лампи в результаті забруднення світильників в процесі експлуатації (його значення визначається по таблиці коефіцієнтів запасу для різних приміщень і в нашому випадку $K=1.5$); n – коефіцієнт використання (виражається відношенням світлого потоку, падаючого на розрахункову поверхню, до сумарного потоку всіх ламп і обчислюється в долях одиниці; Для цього необхідно обчислити індекс переміщення за формулою:

$$I = \frac{S}{h(A + B)}$$

де S – площа приміщення, $S=30\text{м}^2$;

h – розрахункова висота підвісу, $h=3.4$ м;

A – ширина приміщення, $A=5$ м;

B – довжина приміщення, $B=6$ м.

Підставивши значення отримаємо:

$$I = \frac{30}{3.4(5 + 6)} = 0.8$$

Знайшовши індекс переміщення по таблиці знаходимо $n=0.32$;

Підставивши в початкову формулу знаходимо світловий потік:

$$F = \frac{300 * 1.5 * 30 * 1.2}{0.32} = 50625\text{Лм}$$

Для освітлення вибираємо люмінесцентні лампи типа VIPET-N-LED-4800-136-4K, світловий потік яких $F = 4320$ Лк. Розрахуємо необхідну кількість ламп по формулі:

$$n = \frac{F}{F_n}$$

де – N – визначимо число ламп; F – світловий потік;

F_n – світловий потік лампи

$$n = \frac{50625}{4320} = 12 \text{ шт}$$

При виборі освітлювальних приладів використовуємо світильники типу ОД. Кожен світильник комплектується двома лампами. Розміщуються світильники двома рядами, по шість в кожному.

В даній лабораторії встановлено 15 ламп типу V-A4-210-018-6500K, які дають світловий потік 65500Лм. Освітлення в даному приміщенні виконано з дотриманням вимог охорони праці.

6.3 Електробезпека

В даному приміщенні становлено три експериментальних стенда, до кожного в якості робочої напруги використовується напруга змінного струму 380/220В. Всі електричні дроти захищені, також присутні вимикачі, що відключають струм у всьому приміщенні. Всі розетки мають контакт заземлення. Розподільчі щити позначені попереджувальними знаками[...].

Захисне заземлення або занулення, є основним заходом захисту металоконструкції. Основна мета цього заходу - захистити від можливого удару струмом користувача приладу при замиканні на корпус в тому випадку, наприклад поразки електричним струмом в разі замикання фазного проводу на, коли порушена ізоляція. Іншими словами, заземлення є дублером захисних функцій запобіжників. Вимоги щодо застосування занулення(рис.) залежно від величини напруги і категорії приміщень за небезпекою електротравм аналогічні вимогам до застосування захисного заземлення. За величиною напруги мережі живлення застосування занулення обмежується напругою 1000 В.

Згідно з чинними нормативами можливі два варіанти реалізації занулення:

– заземлена через певні відстані (100...200 м) нейтраль мережі виконує функції нульового робочого і нульового захисного провідника одночасно;

– для занулення обладнання прокладається окремий провідник, який виконує функції тільки нульового захисного.

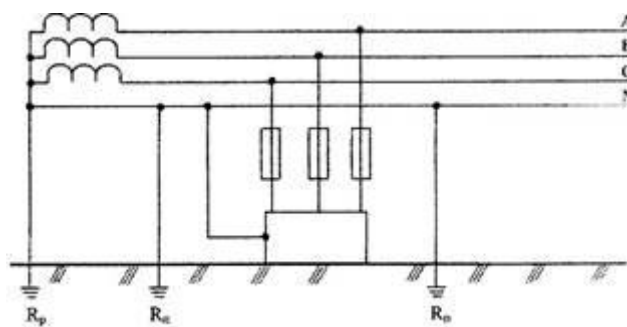


Рис.6.1 - Схема занулення

Принцип роботи занулення: якщо напруга (фаза) потрапляє на з'єднаний з нулем металевий корпус приладу, відбувається коротке замикання. Автоматичний вимикач, включений в пошкоджену ланцюг спрацьовує від короткого замикання і відключає лінію від електрики. Крім цього, відключення електрики від лінії може виконувати плавкий запобіжник.[...]

6.4 Пожежна безпека

Для запобігання пожежі від короткого замикання електрообладнання в приміщенні встановленні захисні автомати здатні запобігти загоранню внаслідок перевантаження та короткого замикання. Горючі та легкозаймисті матеріали в приміщенні відсутні, що зменшує вірогідність виникнення пожежі[...].

Дане приміщення за вибухопожежною та пожежною небезпекою відноситься до категорії В (До категорії В належать паливно-мастильні склади, деревообробні цехи, склади вугілля, приміщення обчислювальних центрів, цехи складання печатних плат.) та класу пожежонебезпеки П-Па (зони приміщень, в котрих є тверді або волокнисті горючі речовини. Горючий пи́л і волокна не виділяються)

У випадку виникнення пожежі необхідно залишити приміщення дотримуючись плану евакуації (рис.)

Для погашення пожежі слід мати наступну кількість вогнегасників для площі приміщення 30м² та категорією будівлі В

- 3 переносних вогнегасника (з газом-витискує в балоні або закачних) з зарядом вогнегасної речовини 5 кг при класі пожежі А, В, С, (Е) при наявності горючих газів та рідин;

- 2 переносних вогнегасника (з газом-витискує в балоні або закачних) з зарядом вогнегасної речовини 5 кг при класі пожежі А, (Е) при відсутності горючих газів та рідин.

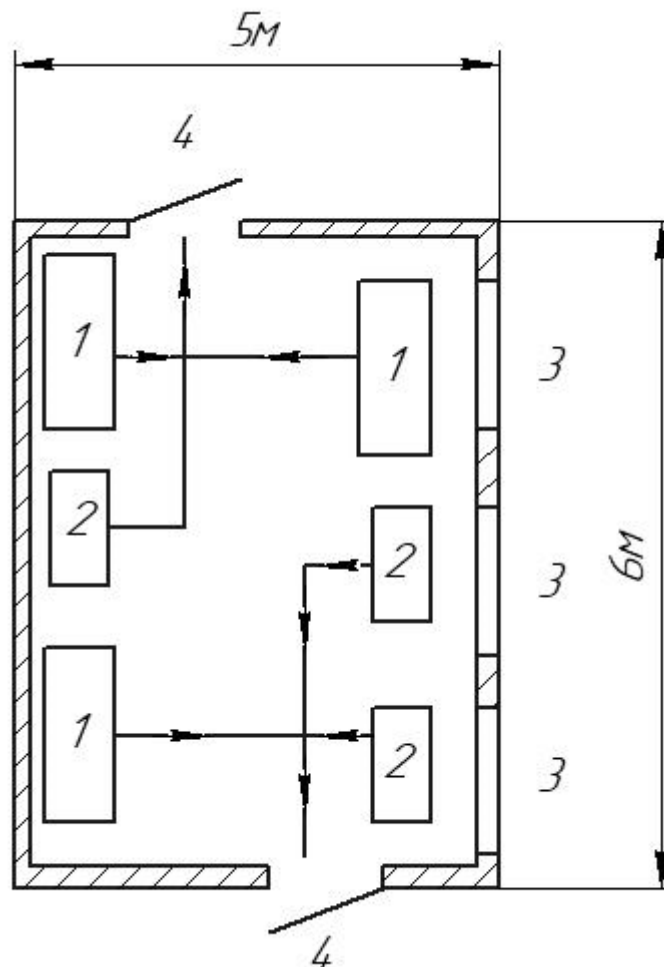


Рис 6.2 - План евакуації приміщення (1 – експериментальні стенди, 2 – робочі місця, 3 – вікна, 4 – вихід)

Для безпечного процесу евакуації умови евакуації мають відповідати стандартам. Значення стандартних і дійсних значень занесені до таблиці 6.2.

Таблиця - 6.2

Відповідність умов евакуації персоналу

Параметри	Нормативні значення	Фактичні значення
Висота дверних проходів, м	не менше 2м	2,2м
Ширина дверних проходів, м	не менше 0,8м	1,2м
Ширина проходу для евакуації, м	не менше 1м	1,3м

Ширина коридору, м	не менше 2м	2,5м
Кількість виходів, од.	2	2
Висота перил сходів, м	не менше 0,9м	1м
Ширина сходів, м	не менше 1м	1м

Умови в даній лабораторії відповідають стандартам евакуації персоналу приміщення.

6.5 Шум

У приміщенні присутнє обладнання, яке являється джерелом шуму: електромотори, насоси, компресори та вентилятори великого діаметра.

Табл.6.3

Джерела шуму та їх наслідки

Джерело	Наслідки	
	Для людини	Для обладнання
Робота обладнання	- Зниження концентрації	Відсутні
Кондиціонери	- Роздратованість	
Витяжки та вентиляція	- Втомлюваність	

Значення рівнів звуку та шуму згідно ДСН.3.3.6.037-99 наведені в табл.

Табл. 6.4

Нормативні та фактичні значення рівнів звуку та шуму

Тип	Фактичні значення	Нормативні значення
Рівень шуму, дБ	до 80	82

Максимальний рівень шуму в приміщенні не перевищує допустимого.

Табл.6.5

Заходи та засоби захисту від шуму

Вид захисту		Засоби подолання небезпеки
Технічні заходи	В обладнанні	Звукоізоляція вібропоглинаючим пінистим поліетиленом, 100%
	В приміщенні	Звукоізолююча конструкція вікон та звукопоглинальні покриття на стінах
Організаційні заходи		Дотримання правил експлуатації обладнання. Режимів праці та сну
ЗІЗ		Навушники

Оцінка пожежної обстановки під час аварії на вибухонебезпечному об'єкті

Причиною виникнення надзвичайної ситуації є газовий трубопровід, що проходить вздовж лабораторії на відстані 20 м. Характеристика елементів лабораторії: будівля – цегляна, кабельні лінії - наземні, контрольно-вимірювальна апаратура-наявна, границя вогнетривкості несучих стін - 2.5 год.

Розрахуємо, в якій зоні знаходиться об'єкт:

Зона I:

$$R_I = 17,5 \sqrt[3]{Q};$$

Де Q - кількість вуглеводневого продукту, т, що визначається з табличних даних [...] для наших параметрів Q=10000

$$R_I = 17.5 * \sqrt[3]{10000} = 370 \text{ м}$$

Зона II:

$$R_{II} = 1,7 R_1;$$

$$R_{II} = 1.7 * 370 = 630 \text{ м}$$

Розрахуємо ступінь руйнувань:

$$\Delta P_2 = 1300 * \left(\frac{R_I}{R_{II}} \right)^3 + 50, \text{кПа}$$

$$\Delta P_2 = 1300 * \left(\frac{370}{630} \right)^3 + 50 = 0,31 \text{ кПа}$$

Таким чином, ступінь руйнування будівлі – слабкий. Наслідки вибуду: часткове руйнування внутрішніх перегородок, покрівлі, дверних і віконних коробок, легких будівель і ін. Основні несучі конструкції зберігаються. Для повного відновлення потрібен капітальний ремонт.

Будівля має III-й ступінь вогнестійкості (будинки з несучими та огорожувальними конструкціями з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону. Для перекриттів допускається використання дерев'яних конструкцій, захищених штукатуркою або важкогорючими листовими, а також плитними матеріалами. До елементів покриттів не висовуються вимоги щодо межі вогнестійкості і меж поширення вогню, при цьому елементи покриття із деревини підлягають вогнезахисній обробці).

Категорія пожежної безпеки В (приміщення, в яких знаходяться (обертаються) горючі і важкогорючі рідини, тверді горючі і важкогорючі речовини і матеріали (в тому числі пил та волокна), речовини і матеріали, здатні при взаємодії з водою, киснем повітря або один з одним тільки горіти).

6.6 Висновки

Проаналізувавши небезпечні на шкідливі фактори в робочому приміщенні з'ясувалося, що приміщення повністю придатне для комфортного та безпечного виконання роботи. У разі вибухонебезпечної ситуації лабораторія потрапляє у зону дії вибухів продукту та матиме слабкий ступінь руйнування та може підлягати як невеликій реконструкції так і капітальному ремонту.

7. Основні висновки та результати роботи

У даній дисертаційній роботі вирішено важливе науково-технічне завдання, яке полягає в оптимізації аеродинамічних характеристик циклона шляхом вивчення особливостей протікання повітря, та обґрунтування його конструкційних параметрів. Внаслідок виконаних досліджень зроблено такі основні висновки:

1. Аналіз відомих конструкцій свідчить про необґрунтованість параметрів циклона, що приводить до збільшення рівня енергоспоживання та зниження екологічної безпеки підприємств. З'ясовано, що гідравлічний опір циклона перевищує 1000 Па при фактичній ефективності 86 %, що є причиною щомісячних перевитрат коштів підприємством на повітроочищення та значних викидів в атмосферу.
2. Розроблено математичну модель руху повітря в циклоні, яка враховує його форму та характеристики повітряного потоку в апараті, дає змогу теоретично обґрунтувати доцільність зміни співвідношення геометричних розмірів циклона та позитивний вплив витоку частини потоку з бункера в атмосферу на експлуатаційні характеристики апарата.
3. Доведено значний вплив відстані (H_v) від нижнього краю вихлопної труби до конічної частини на гідравлічний опір циклона. Зі зростанням H_v від 0,1 діаметра (D) циліндричної частини циклона до $1,5D$ гідравлічний опір апарата знижується на 36,5 %.
4. Розроблено оригінальну конструкцію циклона з фільтруючою сіткою в середині циліндричної частини фільтру.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1.Ананьев А. В. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / Ананьев В. А., Балуева Л. Н., Гальперин А. Д. – М. : Евроклимат, изд. Арина, 2000. – 416 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 413-415. 103 с.
2. а.с.СРСР 793608, кл. В 01 D 45/00, 1981. Фільтр-циклон / Батлук В.А. , Семенова С.В. , опубл. 25.04.97. Бюл. № 2
- 3.Батлук В. А. Наукові основи створення високоефективного пиловловлюючого обладнання : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук : спец. 05.05.02 "Машини для виробництва будівельних матеріалів і конструкцій" / Батлук Вікторія Арсеніївна; НУ "Львівська політехніка". – Львів : НУ "Львівська політехніка", 2001. – 40 с.
4. Біргер М.І., А.Ю. Вальдберг, Б.І. Мягков та ін .Довідник з пило-та золоуловлювання; під заг.ред. А.А. Русанова.- 2 вид., Перероб. і доп.- М.: Вища, 1983.
5. Білуха М. Т. Методологія наукових досліджень : підручник / Білуха М. Т. – К. : АБУ, 2002. – 480 с
6. Василевский М. В. Обеспыливание газов инерционными аппаратами: монография / М. В. Василевский Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. - 258 с.
7. Ватин Н. И. Очистка воздуха при помощи аппаратов типа циклон / Н. И. Ватин, К. И. Стрелец. СПб., 2003. – 9 с.
8. Вахвахов Г. Г. Работа вентиляторов в сети / Вахвахов Г. Г. – М. : Стройиздат, 1975. – 102 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 98-101.
- 9.Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты пылеочистки. Учебное пособие.Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2005. - с.: ил., библиогр. «Справочник по пыле- и золоулавливанию»
- 10.Гордон Г. М. Пылеулавливание в производстве огнеупоров / Гор-дон Г. М., Пейсахов И. Л., Алиев Г. М.-А. М. – М.: Металлургия, 1981. – 182 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 178-181.
11. Л. М. Обобщение результатов математического моделирования движения воздушных потоков циклоне / Л. М. Дорундяк, Ю. Р. Дадак, А. В. Ляшеник, Л. О. Тисовський // Сб. статей Всеросс. науч.-практ. конф. (с междунар. участием) ["Молодые ученые в решении

актуальных проблем науки"]], (Красноярск, 17 – 18 мая 2011 г.). – Красноярск, 2011. – Том 1. – С. 191 –193.

12.Дубинін А. І., Майструк В. В. Циклон з проміжним відведенням осадженого пилу / А. І. Дубинін, В. В. Майструк // Хімічна промисловість України. – 1999. – №2. – С. 40 43.

13.Евстифеев В. Н. Трубопроводный транспорт пластических и сыпучих материалов в строительстве / Евстифеев В. Н. – М. : Стройиздат, 1989. – 248 с

14.Единая методика сравнительных испытаний пылеуловителей для очистки вентиляционного воздуха. – Л. : ВНИИОТ ВЦСПС, 1967.

15.Калашников А. Н. Особенности газодинамики и эффективность прямооточных каплеуловителей компрессорных станций / Калашников А. Н.. – Сумы: ОАО Сумское машиностроительное НПО им. М. В. Фрунзе. – 2003. – 194 с.

16.Калигін В. Г.. Промислова екологія. Курс лекцій. - М.: Изд-во МНЕПУ, 2000. - 240 с

17.Карсканов С. А. Прямое численное моделирование трехмерных течений газа в плоском канале с резким расширением : автореф. дисс. на соискание учен. степени кандидата физико-математических наук : спец. 01.02.05 – "Механика жидкости, газа и плазмы" / Карсканов Сергей Андреевич. – Ижевск, 2009. – 16 с.

18. Каспрук В. Б. Підвищення ефективності пиловловлювання в апаратах із зустрічними закрученими потоками : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.13 "Машини та апарати хімічних виробництв" / Каспрук Володимир Богданович ; ДУ "Львівська політехніка" – Львів, 1998. – 17 с.

19.Климаш Р. Р. Дослідження поля швидкостей запиленого потоку повітря в трубопроводі децентралізованої аспіраційної системи / Р. Р. Климаш, В. В. Шостак, Л. О. Тисовський, Л. М. Дорундяк, А. В. Ляшеник // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.2. – С. 336-341.

20.Ковалев В.А., Яхно О.М. Гидродинамические особенности циркуляционных потоков в замкнутых объемах // монография, Донецк, 2014. – 324 с.

21.Коробов В. В. Пневматический транспорт и погрузка технологической щепы / Коробов В. В. – М. : Лесн. пром-сть, 1974. – 176 с.

22. Коузов П. А. Очистка от пыли газов и воздуха в химической промышленности. / Коузов П. А., Мальгин А. Д., Скрябин Г. М. – Л. : Химия, 1982. – 256 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 254-255.
23. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л. Г. – М. : Наука, 1978. – 736 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 730-735.
24. Ляшеник А. В. Моделювання руху двохфазного потоку в циклоні / А. В. Ляшеник, Л. О. Тисовський, Ю. Р. Дадак, Л. М. Дорундяк // Праці XX Міжнар. симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові. – Львів : НУ "Львівська політехніка", 2011. – С. 246-247.
25. Ляшеник А. В. Обґрунтування конструкції циклона для очищення повітря на підприємствах деревообробної галузі / А. В. Ляшеник, Л. О. Тисовський, Л. М. Дорундяк, Ю. Р. Дадак // Науковий вісник НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21.9. – С. 119-125.
26. Ляшеник А. В. Автоматична система керування фільтрувальною повітроочищувальною станцією / А. В. Ляшеник, Л. О. Тисовський, Л. М. Дорундяк, Ю. Р. Дадак // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.6. – С. 96-103.
27. Мазус М. Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей / Мазус М. Г., Мальгин А. Д., Моргулис М. Л. – М. : Машиностроение, 1985. – 240 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 236-239.
28. Меклер В. Я. Вентиляция и кондиционирование воздуха на машино-строительных заводах / Меклер В. Я., Овчинников П. А., Агафонов Е. П. – М. : Машиностроение, 1980. – 336 с. : ил., табл. – Библиогр.: с. 332-334.
29. Очистка промышленных газов от пыли / Ужов В. Н., Вальдберг А. Ю., Мягков Б. И., Решидов И. К. – М. : Химия, 1981. – 392 с.
30. Пилипчук М. І. Основи наукових досліджень / Пилипчук М. І., Григор'єв А. С., Шостак В. В. – К. : Знання, 2007. – 272 с. : іл., табл. – Бібліогр.: с. 271.
31. Шаприцкий В. Н. Очистка загрязнений воздуха в металлургии / Шаприцкий В. Н. – М. : Металлургия, 1965. – : ил., табл. – Библиогр.: с. 180 с-182.
32. Batluk V. Matematic model of the process of dust catching in an apparatus with a movable separator / V. Batluk, V. Batluk, M. Basov, L. Dorundyak // Econtchmod an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes. – Lublin-Lviv-Cracow, 2012. – Vol. 1. – N 1.09-12. – P. 13-16.

33. Пат. 95941 Україна МПК В04С 5/181. Циклонний сепаратор / ГАНСЕН МОРТЕН
КААР опубл. 26.09.2011, Бюл.№ 18, 2011 р.
34. Пат. 62949 Україна МПК В04С 9/00. Фільтр-циклон / Гапонюк О. І. , Джулинський Д.
П. опубл. 26.09.2011, Бюл.№ 18, 2011 р.
35. Frank Th. Lagrangian Prediction of Disperse Gas – Particle Flow in Cyclone Separators / Frank
Th., Wassen E., Q. Yu. // Paper [Third International Conference on Multiphase Flow – ICMF'98],
(Lyon, France, June 8-12, 1998). – No. 217. – p. 1-8.
36. <http://www.kondor-eco.ru/main/ciclone.htm>